

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení



Výpočet a měření parametrů pneumatických rotačních motorů

**Calculation and measurement of parameters of pneumatic
rotary motors**

Student:

Lukáš Kvíčala

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Kvíčala**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Výpočet a měření parametrů pneumatických rotačních motorů**
Calculation and Measurement of Parameters of Pneumatic Rotary Motors
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte přehled typů a konstrukčních provedení pneumatických rotačních motorů, jejich základních parametrů, charakteristik, výpočtových vztahů a porovnání s jinými typy motorů.
- 2) Uveďte aplikace pneumatických rotačních motorů v pohonech strojů.
- 3) Navrhněte experiment a proveďte měření momentové a výkonové charakteristiky pneumatického rotačního motoru.

Seznam doporučené odborné literatury:


KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy Díl I. - Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB–TU Ostrava, 2005. 275 s. ISBN 80-248-0879-X.
KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training - Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.
BEATER, P. *Pneumatic Drives: System design, Modeling and Control*. Berlín: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3540-69470-0.
SCHWATE, W. *Handbuch Drucklufttechnik*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986. 324 s. ISBN 3-342-00079-1.
Katalogy a firemní prospekty.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016


doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :16.5.2016.....

..........

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 16.5.2016

.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Kvíčala

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Prostřední Bludovice 391, 739 37

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Kamilu Fojtáškoví, Ph.D. za odborné vedení, rady, trpělivost a velkou pomoc při tvorbě této bakalářské práce. Dále pak děkuji katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení za odbornou pomoc a zapůjčení vybavení potřebného k uskutečnění zkušebního měření. Velké poděkování náleží celé rodině za podporu a povzbuzování po dobu mého studia.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KVÍČALA, L. *Výpočet a měření parametrů pneumatických rotačních motorů: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 55 s. Vedoucí práce: Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá přehledem typů a konstrukčních provedení pneumatických rotačních motorů. Tato práce uvádí jejich základní parametry, charakteristiky, výpočtové vztahy a porovnání s jinými typy motorů. V další části je uveden přehled aplikací pneumatických rotačních motorů v pohonech strojů. V závěrečné části bakalářské práce je provedena realizace měření momentové a výkonové charakteristiky pneumatického rotačního motoru. V posledním bodě proběhlo porovnání charakteristik uvedených v katalogu výrobce značky PARKER s naměřenými charakteristikami.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KVÍČALA, L. *Calculation and measurement of parameters of pneumatic rotary engines: Bachelor thesis.* Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2016, 55 p. Thesis head: Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

This bachelor thesis deals with the types and designs of pneumatic rotary engines. This thesis presents the basic parameters, characteristics, calculation formulas and compared with other types of engines. The next part provides an overview of applications of pneumatic rotary motors driving machines. In the final part of the thesis is the implementation of a measurement and torque and performance characteristics of pneumatic rotary engine. The last point was to compared the characteristics listed in the catalog of the manufacturer PARKER with the measured characteristics.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod	10
1. Rotační pneumatické motory	11
1.1 Popis rotačních pneumatických motorů	11
1.2 Výhody a nevýhody pneumatických motorů	11
1.2.1 Výhody pneumatických motorů	11
1.2.2 Nevýhody pneumatických motorů	12
1.3 Rozdělení rotačních pneumotorů	12
1.3.1 Rotační pístové motory	13
1.3.2 Lamelové motory	17
1.3.3 Zubové pneumotory	25
1.3 Pracovní parametry pneumatických rotačních motorů	27
1.3.1 Momentová charakteristika motoru v závislosti na otáčkách	28
1.3.2 Výkonová charakteristika motoru v závislosti na otáčkách	29
1.3.3 Průtoková charakteristika motoru v závislosti na otáčkách	29
1.4 Turbínové motory	30
1.5 Základní výpočtové vztahy turbínového motoru	32
1.6 Princip práce turbínového pneumotoru	33
1.7 Výhody a nevýhody turbínových pneumotorů	35
1.7.1 Výhody turbínových pneumotorů oproti pneumotorům objemového typu (pístové, lamelové, zubové)	35
1.7.2 Nevýhody turbínových pneumotorů oproti pneumotorům objemového typu (pístové, lamelové, zubové)	35
2. Aplikace pneumatických rotačních motorů v pohonech strojů	35
2.1 Aplikace podle typů motorů	36
2.1.1 Pístové pneumatické rotační motory	36
2.1.2 Zubové pneumatické rotační motory	37
2.1.3 Lamelové pneumatické rotační motory	38
2.1.4 Turbínové pneumatické rotační motory	40
3. Úvod do problematiky měření momentové a výkonové charakteristiky	41
3.1 Měřicí obvod	42
3.2 Schéma měřicího obvodu	43
3.3 Popis jednotlivých součástí pneumatického obvodu	44
3.4 Popis navrhovaného experimentu	47
4. Srovnání charakteristik uvedených v katalogu výrobce s naměřenými charakteristikami	49

5. Závěr.....	51
6. Seznam použité literatury	52
Přílohy	54

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Význam	Jednotky
D	průměr pístu, průměr ozubeného kola	[m]
C_u	tangenciální rychlost	[m·s ⁻¹]
F	síla	[N]
H	zdvih pístu	[m]
L	délka rotoru, délka motoru	[m]
L_{ad}	adiabatická práce	[J]
M	krouticí moment	[N·m]
P	výkon, příkon	[W]
Q	objemový průtok, spotřeba vzduchu	[m ³ ·s ⁻¹]
Q_m	množství vzduchu	[kg · s ⁻¹]
R	poloměr statoru	[m]
S	plocha	[m ²]
V_g	geometrický objem	[m ³]
a	tloušťka lamel	[m]
e	excentricita	[m]
m	modul ozubení	[1]
n	otáčky	[s ⁻¹]
n	polytropický exponent	[1]
p	tlak, přetlak	[Pa]
p_i	střední indikovaný tlak	[Pa]
q	specifická spotřeba vzduchu	[m ³ ·h ⁻¹ ·kW]
r	poloměr rotoru	[m]
u	rychlost	[m·s ⁻¹]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
z	počet válců, počet lamel	[1]
α	úhel natočení	[°, rad]
β	úhel mezi lamelami	[°, rad]
λ	opravný součinitel	[1]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
δ	součinitel poměrného plnění	[1]
η	účinnost	[% , 1]

Úvod

Ve své bakalářské práci se zabývám problematikou pneumatických rotačních motorů. Tyto motory využívají pro vyvození výstupního rotačního pohybu tlakovou energii pracovního média, konkrétně stlačeného vzduchu. Podle toho, na jaký pohyblivý prvek uvnitř motoru je tato energie předávána, můžeme pneumatické rotační motory rozdělit na několik konstrukčně poměrně odlišných typů. V úvodu práce se budu zabývat právě tímto rozdělením jednotlivých pneumatických motorů, z hlediska jejich konstrukce, funkce, základních výpočtových vztahů, výstupních charakteristik a porovnání s jinými typy motorů.

Dále budou v práci uvedeny základní parametry a možnosti použití pneumatických rotačních motorů v konkrétních průmyslových aplikacích. Cílem práce je kromě uvedení všeobecného přehledu, také navrhnout a realizovat experimentální měření momentové a výkonové charakteristiky libovolného pneumatického rotačního motoru.

1. Rotační pneumatické motory

Prvky pneumatických mechanismů vždy přitahovaly pozornost svými výjimečnými vlastnostmi, a to především konstrukční, a tím i technologickou jednoduchostí, jejímž důsledkem je vysoká provozní spolehlivost a nenáročnost na údržbu. Pneumatické rotační motory jsou charakteristické tím, že automaticky přizpůsobí otáčky při změně zátěže.

1.1 Popis rotačních pneumatických motorů

Do skupiny objemových strojů zařazujeme právě pneumatické rotační motory. Tyto stroje pracují na principu, kde se předává tlaková energie vzduchu na pohyblivý člen, který vykonává rotační pohyb. [1]

1.2 Výhody a nevýhody pneumatických motorů

Pneumatické motory nacházejí stále větší využití, a to především díky svým nesporným výhodám oproti elektrickým motorům. Významné jsou především jako pohon pro ruční nářadí. Hlavní výhodou pneumatických motorů je vysoký poměr výkonu a hmotnosti, nabízí srovnatelný výkon při 1/3 konstrukční velikosti elektromotoru. Toto je důležité především u ručního nářadí, neboť při dlouhodobém užívání je znatelná každá úspora jeho hmotnosti. [2]

1.2.1 Výhody pneumatických motorů

- Bezpečnost (možnost použití v prostředí s nebezpečím výbuchu)
- Utěsnění (pro použití pod vodou)
- Odolnost vůči kyselinám
- Sterilizace (pro vícenásobné použití v čistém prostoru)
- Odolnost vůči čisticím prostředkům (vhodné pro použití v potravinářském průmyslu)
- Robustnost (dlouhá životnost, použití i v extrémních podmínkách)
- Snadná údržba (jednoduchá montáž a instalace)
- Kompaktnost (1/3 zástavbové velikosti stejně výkonného elektromotoru)
- Nízká hmotnost (1/5 hmotnosti stejně výkonného elektromotoru)
- Odolnost vůči vibracím, vysokým teplotám, prachu
- Odolnost proti přetížení (zátížitelné bez jakýchkoli poškození až do klidového stavu)
- Reverzace (použitelné pro oba směry otáčení)

- Snadná regulace (plynulá regulace změnou tlaku či množství vzduchu přiškrcením) [1],[2]

1.2.2 Nevýhody pneumatických motorů

- Nízká účinnost
- Objemové ztráty (ztráta kompresní práce při reverzaci expanzí do atmosféry)
- Vysoké náklady na energii
- Úprava vzduchu (musí se odstranit veškeré nečistoty, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebování prvků)
- Nutnost přimazávání vzduchu (kvůli mazání pohyblivých částí nutno použít maznice)
- Hlučnost (v důsledku expanze tlakového vzduchu na tlak atmosférický, používají se tlumiče) [1],[2]

1.3 Rozdělení rotačních pneumotorů

Existuje mnoho konstrukčních provedení pneumatických rotačních motorů. V této kapitole zmíním typy motoru používané ve veškerých průmyslových odvětvích. Pod pojmem rotační pneumotor rozumíme zařízení, které má na výstupním členu rotační pohyb. [1]

K jednotlivým typům pneumatických pneumotorů je možno přiřadit tyto pracovní parametry:

Tab. 1 Pracovní parametry pneumotorů [1]

Typ motoru	Výkon [kW]	Otáčky [min ⁻¹]
- ozubení přímé	1,5 – 15	1450 – 3000
Zubový - ozubení šikmé	10 – 40	1450
- ozubení šípové	20 -60	1450
- Radiální	2 – 20	400 – 1500
Pístový		
- Axiální	0,5 -5	400 - 1000
Lamelový	0,1 - 5	10 – 50 000
Turbínový	2,2 – 4,6	až 400 000

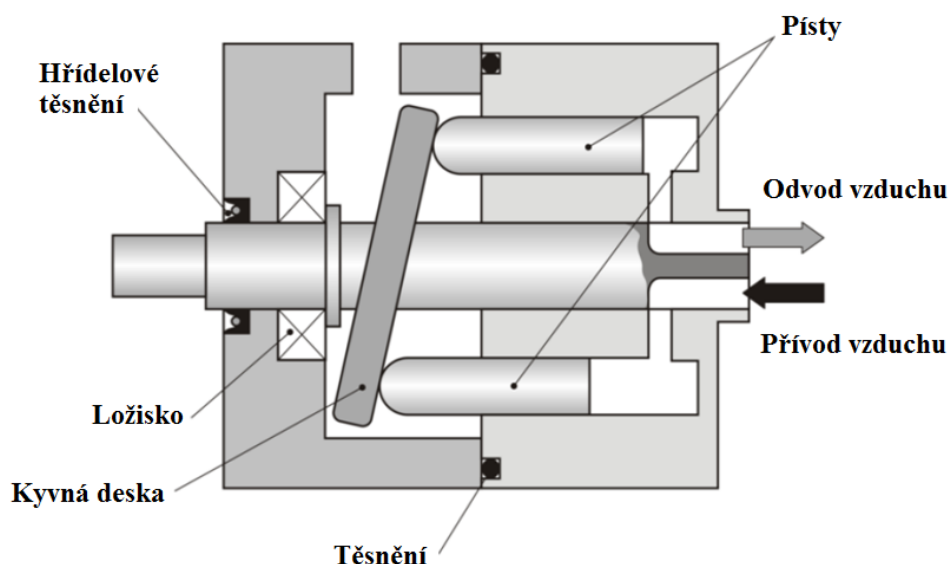
1.3.1 Rotační pístové motory

Tento typ motorů je možné dále rozdělit podle konstrukce do skupiny radiálních a axiálních pístových rotačních motorů. Výstupní hřídel pneumatického rotačního motoru je poháněna stlačeným vzduchem přes písty a spojovací tyče. Pro zajištění plynulého chodu je použito většího počtu pístů. Výkon motoru je závislý na vstupním tlaku, počtu pístů, ploše pístu a jejich zdvihu a objemovém průtoku. [3]

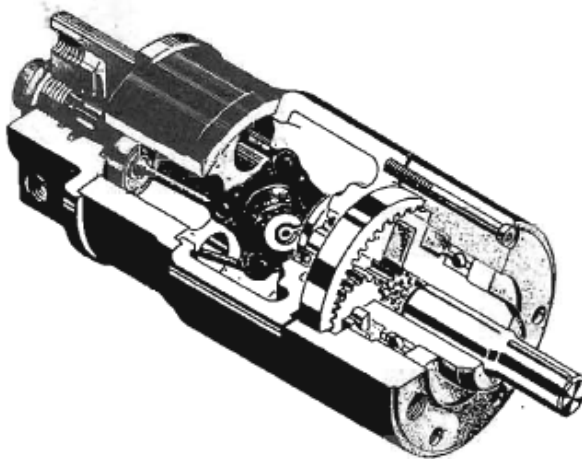
Princip funkce pístového axiálního motoru Obr. 1 je podobný jako u motoru pístového radiálního. Síla z pěti axiálně uspořádaných válců se převede do rotačního pohybu pomocí kyvné desky. Stlačený vzduch je přiváděn do dvou pístů současně a tím je vyvážen točivý moment a tak je zajištěn plynulý chod motoru. [3]

Axiální pístové pneumatické motory mohou pracovat v obou směrech otáčení. Maximální rychlost se pohybuje okolo 5000 min^{-1} , s rozsahem výkonů při normálním tlaku v rozmezí $1,5 - 19 \text{ kW}$. [3]

Oba typy těchto motorů se vyznačují tím, že na rozdíl od jiných konstrukčních typů mají pulsující křivky točivého momentu a rychlosti otáčení. Provedení pohonu s axiálním pístovým rotačním motorem je relativně vzácné, tudíž méně používané, i když má nejvyšší točivý moment oproti ostatním pneumotorům. [4]

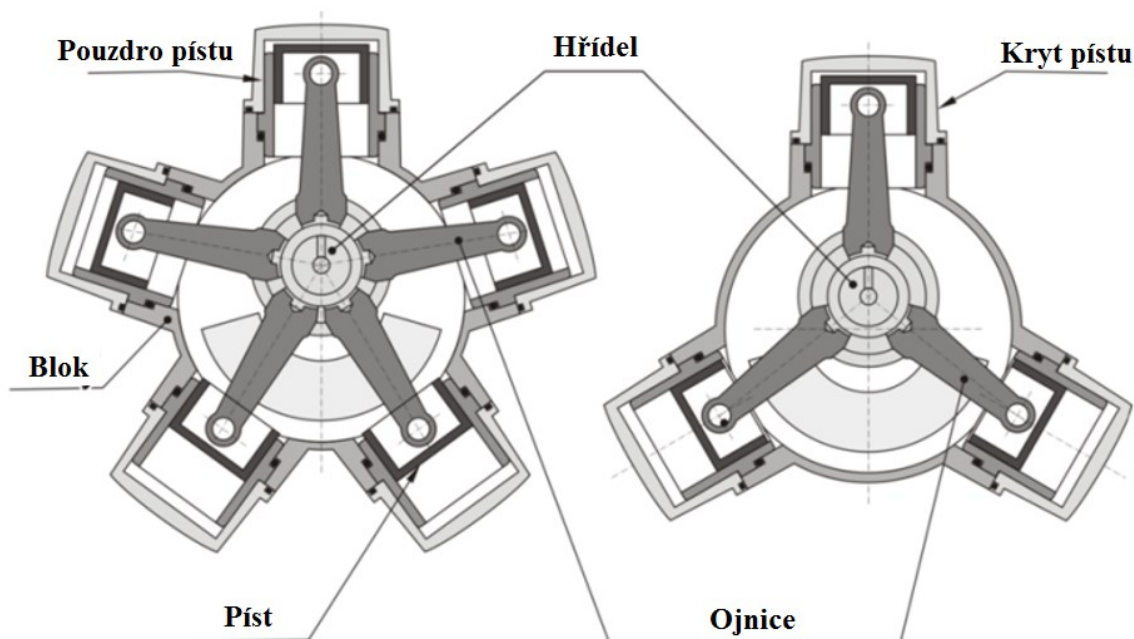


Obr. 1 Konstrukce axiálního pístového motoru [4]



Obr. 2 Axiální pístový motor [5]

Konstrukce radiálního pístového uspořádání jsou běžnější. Vyrábějí se ve dvou variantách a to jako tři nebo pěti pístové radiální pneumatické rotační motory Obr. 3. Uspořádání válců se také říká hvězdové (vždy lichý počet). Ojnice radiálního motoru je připevněna excentricky na hřídel a na ní připojené protizávaží. [4]



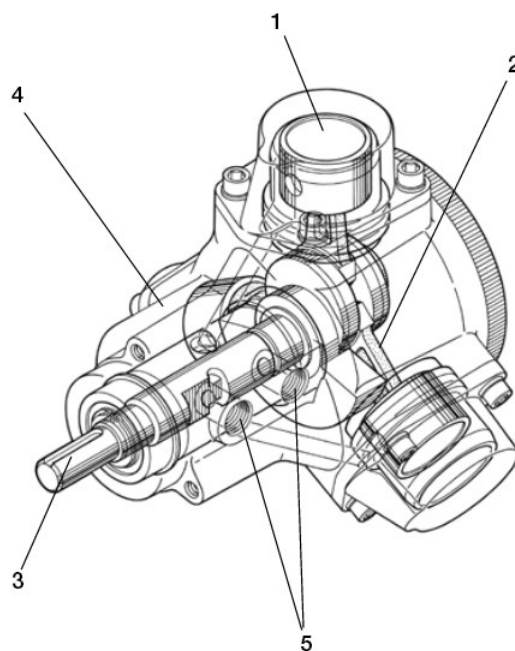
Obr. 3 Konstrukce radiálního pístového motoru [4]

Firma Parker nabízí tuto konstrukční možnost. Rozsah výkonu radiálních pístových motoru se pohybuje v rozmezí $0,5 \div 50 \text{ kW}$, nejčastější rozmezí výkonu je od 2 do 15 kW. Optimální rozmezí otáček se pohybuje od $350 \text{ do } 1500 \text{ min}^{-1}$ a pracovní tlaky od 0,4 do 0,6 MPa. Těsnění ve válcích pístu nám zajišťuje minimální ztráty stlačeného vzduchu a tím získáváme i nízkou spotřebu vzduchu, která se pohybuje v hodnotách od 45 až 65 m^3/kWh . [6]

U tohoto pneumatického pístového rotačního motoru je velice důležitý geometrický objem, kde geometrický objem motoru V_g je dán plochou pístu, zdvihem pístu H a počtem válců z tedy: [6]

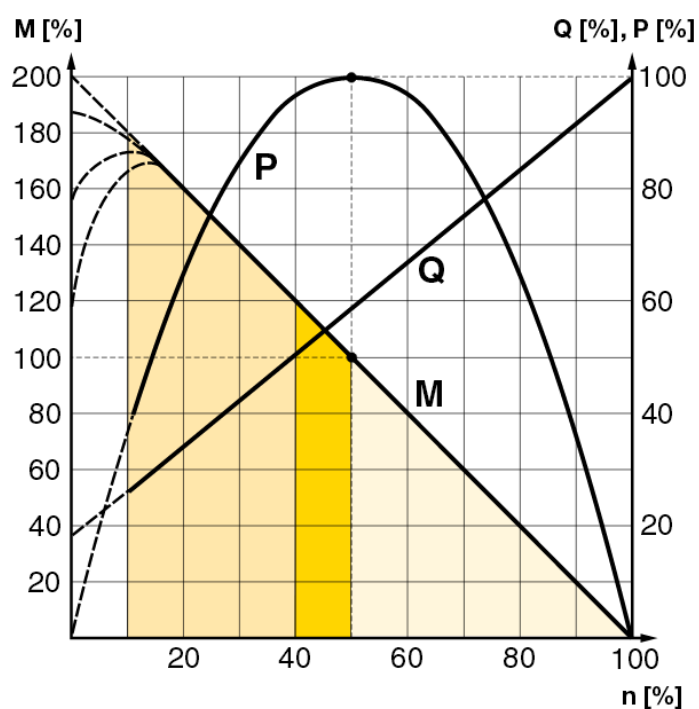
$$V_g = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \cdot z \quad (1)$$

Pneumatické radiální pístové motory se vyrábějí v široké škále výkonů. U těchto motorů výrobci zvolili princip radiálního pístu vzhledem k vysokému točivému momentu, nízké úrovni hluku a dlouhé životnosti bez nutnosti servisního intervalu. Jejich kompaktní rozměry a nízká hmotnost znamenají pro tyto motory snadnou instalaci prakticky ve všech aplikacích. Motory P1V-P Obr. 4 firmy PARKER můžou být vybaveny také planetovým převodem s různými převodovými poměry a tím produkovat požadovanou rychlost a točivý moment pro výstupní hřídel. Do každého motoru je přiváděn vzduch buď na vstup A nebo B v závislosti na požadovaném směru otáčení. Je-li vzduch přiváděn do vstupu A, vstup B se používá jako výfukový kanál. Chceme-li změnit směr otáčení, vzduch je přiváděn do vstupu B a vstup A se pak chová jako výfukový kanál. Přívod vzduchu z kanálu A nebo B se rozdělí na písty 1 pomocí rotační funkce ventilu na výstupní hřídeli 3. Písty 1 jsou připojeny na výstupní hřídel 3 s pomocí spojovacích tyčí 2 a odpadní vzduch z každého válce je předán zpět do vstup A nebo B pomocí rotačního ventilu. [7]



Obr. 4 Radiální pístový motor Parker [7].

1-Píst, 2-Spojovací tyče, 3-Hřídel, 4-Blok motoru, 5-Vstup A, B



Obr. 5 Charakteristika motoru [7]

P = výkon [kW], M = krouticí moment [$\text{N}\cdot\text{m}$], Q = spotřeba vzduchu [$\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$],

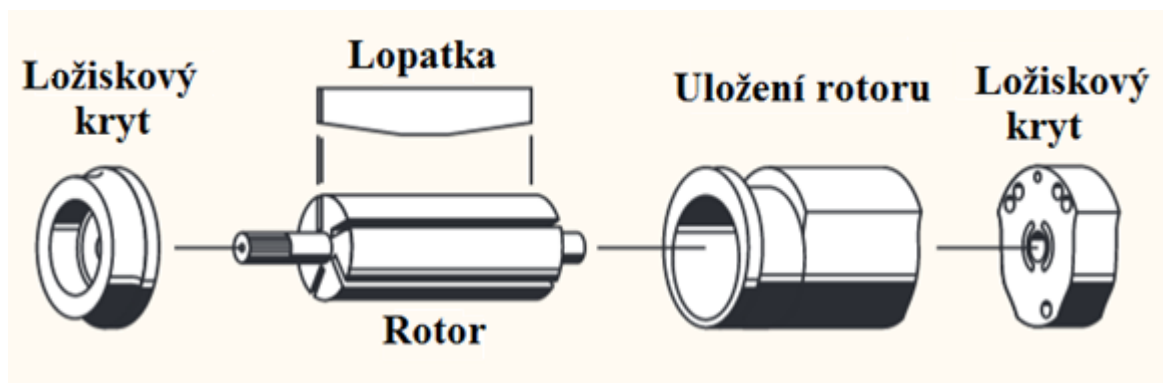
n = otáčky [min^{-1}]

Na Obr. 5 je znázorněna charakteristika pneumatického radiálního motoru, kde jsou vyznačeny křivky krouticího momentu, výkonu a spotřeby vzduchu, které lze odečíst v závislosti na rychlosti otáčení. Výkon je nulový, jestliže je motor v klidu a také během chodu motoru při volnoběžných otáčkách (100%) bez zatížení. Maximální výkon (100%) je obvykle vyvinut, když je motor regulován přibližně do poloviny volnoběžných otáček (50%). [7]

Moment při volnoběžných otáčkách je nulový, ale zvyšuje se (lineárně) s rostoucím zatížením, dokud se motor nezastaví. Protože motor může zastavit s písty v různých pozicích, není možné určit přesný rozběhový moment. Nicméně minimální rozběhový moment je uveden ve všech tabulkách výrobce. Spotřeba vzduchu je největší na volnoběžných otáčkách a klesá s klesající rychlostí, jak je uvedeno ve výše uvedeném diagramu. Pneumatické pístové radiální motory by neměly být používány při rychlostech vyšších než počet otáček naprázdno (rychlost při maximálním výkonu), neboť to výrazně snižuje životnost. [7]

1.2.1 Lamelové motory

Všechny lamelové motory Obr. 6 se v zásadě skládají z rotoru, který obíhá v excentricky uloženém statoru. Lamely Obr. 7 jsou vlivem odstředivé síly vysouvány směrem k plášti statoru a tvoří tak pracovní komory, jejichž objem se zvětšuje ve směru otáčení a ve výfukové výseči se znovu zmenšuje. Díky vzniklé expanzi utěsněného vzduchu se tlaková energie mění na kinetickou energii a tím dojde k otáčení rotoru. [8], [17]



Obr. 6 Konstrukce lamelového motoru [8]



Obr. 7 Lamely [8]

Geometrický objem lamelového pneumatického motoru je popsán vztahem (2), kde L je délka rotoru, $e=R-r$ je excentricita, $\frac{\beta}{2}$ je poloviční úhel mezi sousedními lamelami, R je poloměr statoru a r je poloměr rotoru, z je počet lamel a parametr a je jejich tloušťka. [6]

$$V_g = 4 \cdot L \cdot e \cdot R \cdot \sin \cdot \frac{\beta}{2} \cdot z \cdot \lambda \quad (2)$$

Opravný součinitel λ vyjadřující vliv tloušťky lamel je popsán vztahem (3)

$$\lambda = 1 - \frac{a \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (3)$$

Tento vliv můžeme vyjádřit hodnotami $\lambda = 0,88$ až $0,92$, kde větší hodnota je pro $z > 5$ a $R > 20 \text{ mm}$. [6]

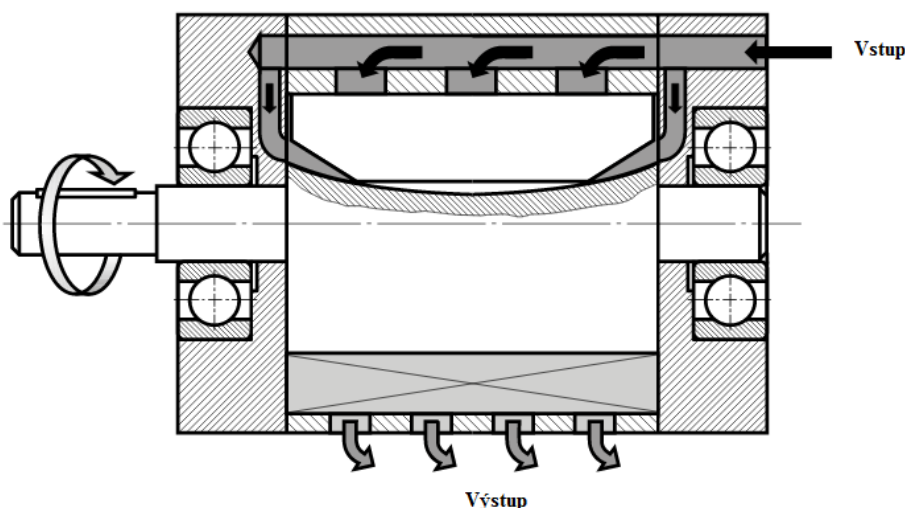


Obr. 8 Pravotočivý, levotočivý a reverzační lamelový motor [8]

V závislosti na požadavku aplikace může rotor obsahovat 3 až 6 lopatek. Vyšší množství lopatek má za následek vyšší bezpečnost startu při vyšších třecích ztrátách. Tangenciální pole lopatek poskytuje větší výstup lopatky a tím i větší životnost motoru. Prakticky všechny vzduchové motory DEPRAG zahrnují specializovanou povrchovou úpravu uložení rotoru, což zvyšuje životnost lopatky. [8]

V praxi lamelové motory udržují relativně konstantní oběžnou rychlost, která je v závislosti na konstrukci motoru mezi 25 a 30 m/sec. [8]

Firma Parker nabízí lamelové pneumatické motory v široké škále výkonů. Pro jejich malé vnější rozměry, jednoduchou konstrukci a spolehlivý provoz, jsou vhodné pro celou řadu aplikací. Lamelový motor Obr. 9 má rotor s řadou lopatek, které jsou uloženy v rotoru. Spolehlivý rozběh motoru je zajištěn pružinami, které vysouvají lopatky proti uložení v rotoru. [9]

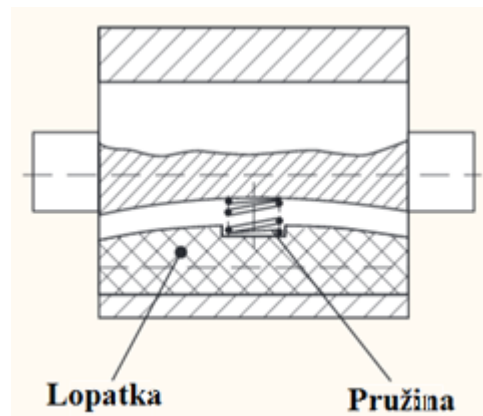


Obr. 9 Princip funkce lamelového motoru [9]

Během provozu pneumatického lamelového motoru jsou lopatky tlačeny proti stěně uložení rotoru odstředivou silou a utěsňují jednotlivé pracovní komory. Pokud existují zvláštní požadavky na rozběhový moment, musí být splněna vhodná opatření, aby byl zaručen spolehlivý rozběh. Tyto rozběhové podmínky nám zajišťují např. [9]

- pružinové lopatky Obr. 10, Obr. 11,
- kolíkové lopatky,
- přítlačné kroužky,
- vakuové indukce, atd. [9]

S výše uvedenými možnostmi je možné dosáhnout rozběhového točivého momentu, který je přibližně 1,5 násobek jmenovitého momentu. [9]

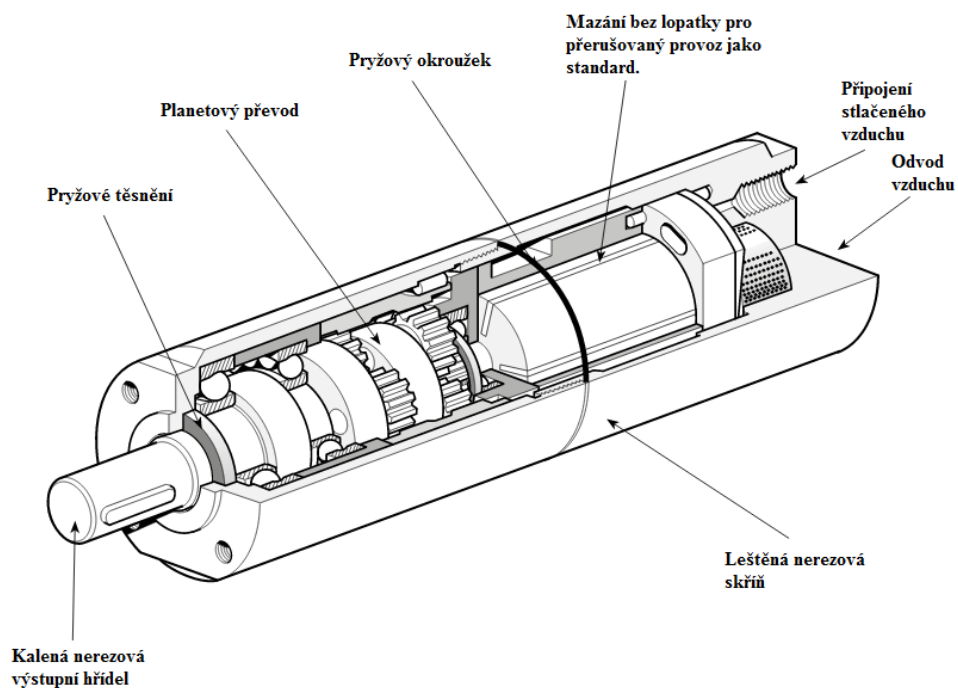


Obr. 10 Řez rotorem s lopatkou [9]

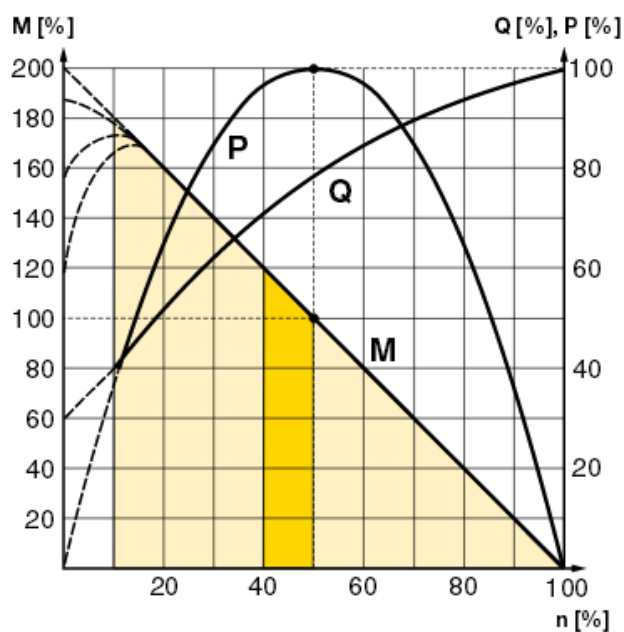


Obr. 11 Pružinové lopatky [9]

Výkon lamelových motorů se pohybuje od několika desítek W do 5 kW, ojediněle v některých strojích (nakládače, dopravníky, kladkostroje, startéry) až do výkonu 20 kW. Otáčky lamelových motorů mají rozmezí od desítek tisíc za minutu pro malé výkony až do několika set otáček za minutu pro největší výkony. Dvojstupňového planetového převodu Obr. 12 se často používá pro regulaci vysokých otáček. [6]



Obr. 12 Lamelový pneumatický motor s dvoustupňovým planetovým převodem [9]



Obr. 13 Charakteristika lamelového rotačního pneumatického motoru [9]

P = výkon [kW], M = krouticí moment [$\text{N}\cdot\text{m}$], Q = spotřeba vzduchu [$\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$],

n = otáčky [min^{-1}]

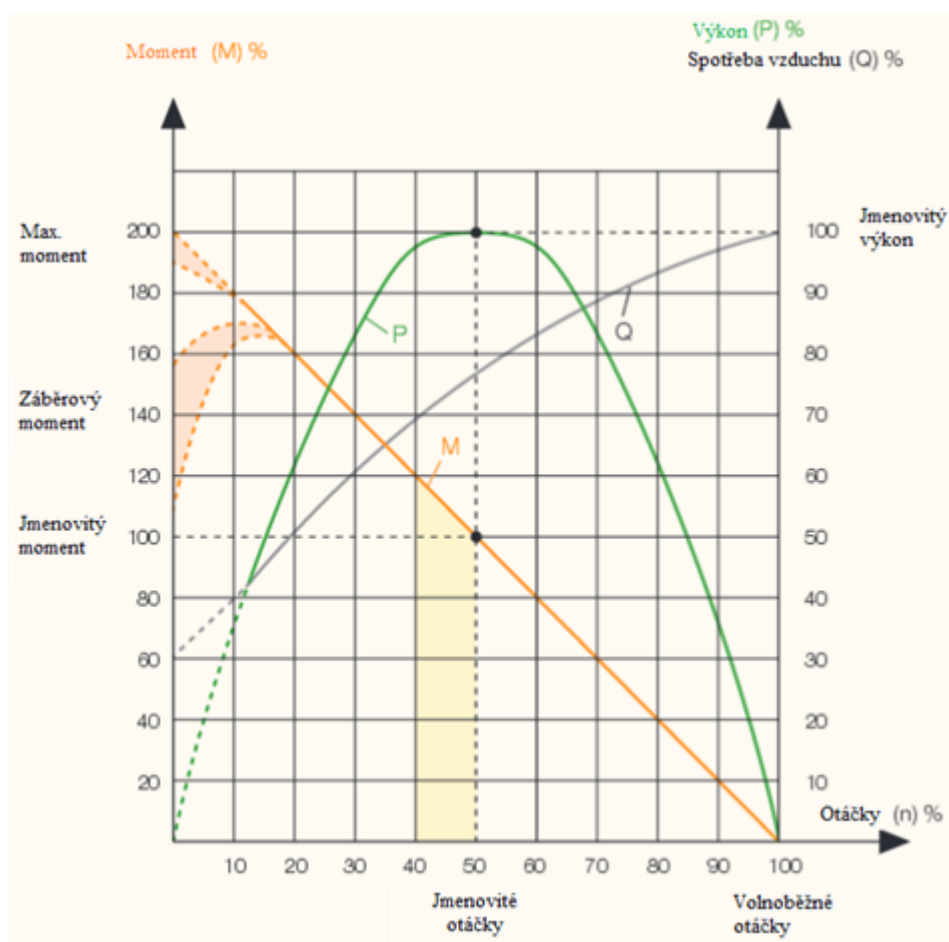
Charakteristika tohoto motoru Obr. 13 je téměř stejná s pístovými radiálními motory. Rozdíl je vidět pouze u křivky spotřeby vzduchu, která zde neklesá lineárně, jak tomu bylo u radiálních pístových motorů. U těchto motorů je možnost regulovat otáčky několika způsoby. [9]

Regulace otáček může být dosažena změnou provozního tlaku nebo změnou množství vzduchu. [10]

Změna otáček pomocí změny zátěže:

Pneumatické motory jsou charakteristické tím, že se otáčky přizpůsobí při změně zátěže zcela automaticky. Bez zatížení pracuje pneumatický motor při otáčkách na prázdko. S nízkým krouticím momentem jsou jmenovité otáčky blízké otáčkám naprázdno.

Zatížením motoru Obr. 14 se nám zvýší krouticí moment a tím se sníží jmenovité otáčky. [10]



Obr. 14 Změna otáček pomocí zátěže [10]

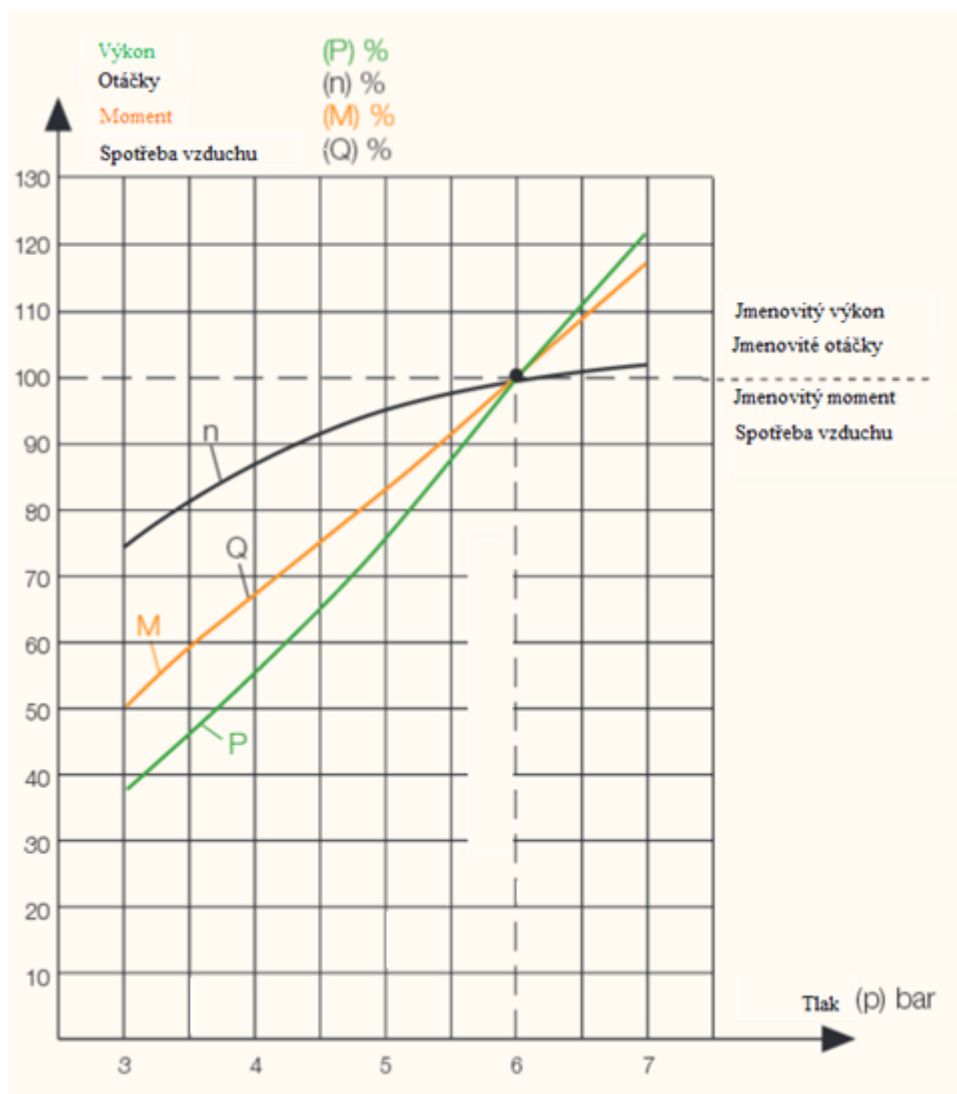
Z hlediska efektivity provozu je tedy vhodné motor využívat v oblasti jmenovitých otáček (50% otáček naprázdno), čímž bude dosaženo maximálního výkonu motoru. [10]

Úprava otáček provozním tlakem

Technická data pneumatických motorů DEPRAG jsou udávána při pracovním přetlaku stlačeného vzduchu 0,6 MPa.

Můžeme tak změnit tlak libovolně mezi 0,4 a 0,63 MPa a přizpůsobit tak plynule otáčky, výkon, krouticí moment a spotřebu vzduchu pneumatického motoru. [10]

Přizpůsobovací faktory jsem uvedl v tab. 2 nebo je lze odečíst z Obr. 15



Obr. 15 Úprava otáček provozním tlakem [10]

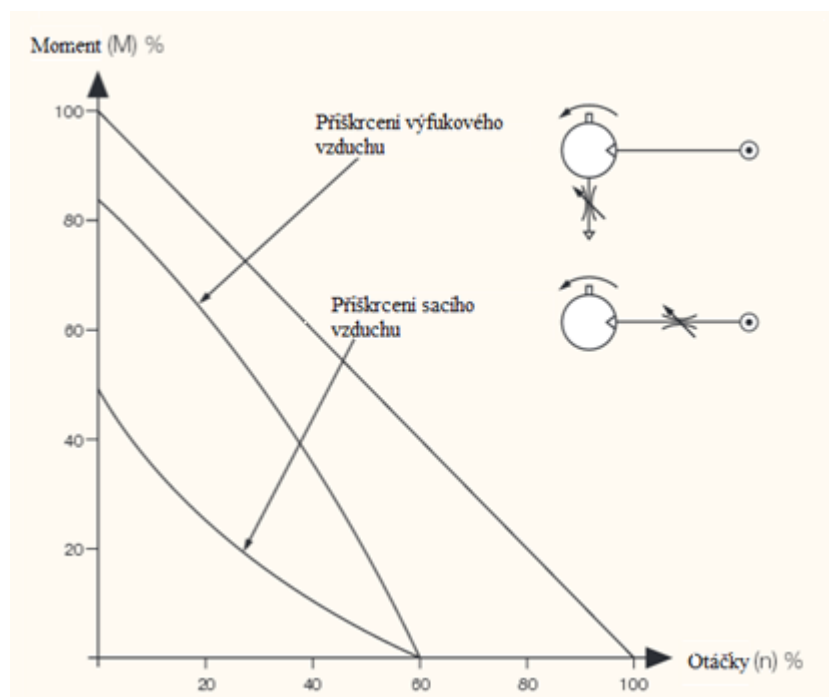
Tab. 2 Přizpůsobovací faktory [10]

Tlak (p) MPa	Výkon (P) %	Otáčky (n) %	Moment (M) %	Spotřeba vzduchu (Q) %
0,7	121	103	117	117
0,6	100	100	100	100
0,5	77	95	83	83
0,4	55	87	67	67
0,3	37	74	50	50

Úprava otáček množstvím vzduchu

Přiškrcením výfukového vzduchu snížíme otáčky motoru, aniž by klesl výkon, respektive se nám značně sníží krouticí moment pneumatického motoru Obr. 16.

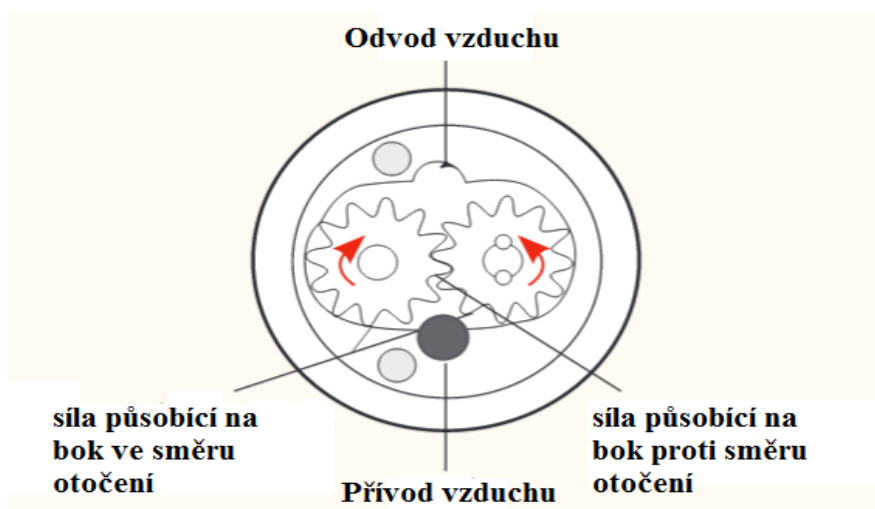
Chceme-li dodatečně k otáčkám motoru snížit i výkon resp. krouticí moment, je nutné přiškrcení přiváděného vzduchu. [10]



Obr. 16 Různý průtočný průřez [10]

1.2.2 Zubové pneumotory

Ve srovnání s pístovými motory o stejném výkonu jsou zubové pneumatické motory Obr. 18 jednodušší a mají také menší rozměry konstrukce. Zubový motor je tvořen skříní motoru, ve které jsou uloženy dva ozubené rotory s nepatrnými čelními a obvodovými vůlemi, které obíhají v tělese Obr. 17. Jedno kolo je pevně spojeno s hřídelí a slouží k vytvoření krouticího momentu. Vyfukovaný vzduch je v komorách, které jsou tvořeny hranou zubu a stěnou tělesa, je veden ke straně výfuku vzduchu - vzniká otáčivý pohyb. [8]



Obr. 17 Schéma zubového pneumotoru [4]



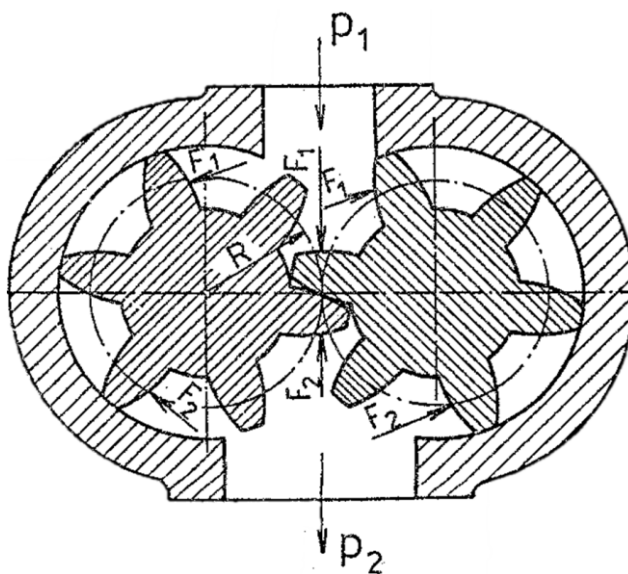
Obr. 18 Zubový pneumatický motor [4]

I u tohoto motoru je potřebné znát jeho geometrický objem, který se stanoví za předpokladu, že plocha zubové mezery je stejná jako plocha zubu. Vztah je dán roztečným průměrem ozubeného kola D , modulu ozubení m a délkou motoru L . [6]

$$V_g = \pi \cdot D \cdot 2 \cdot m \cdot L \quad (4)$$

Zuby ozubených rotorů jsou buďto přímé, šikmé nebo šípové. Motory se zuby šikmými a přímými pracují jako plnotlaké. Ozubeným převodem nebo záměnou odvodu a přívodu vzduchu lze změnit smysl jejich otáčení. Motory se šípovými zuby využívají částečné expanze. Pouze ozubeným převodem lze provést reverzi otáček pneumatického motoru. [6]

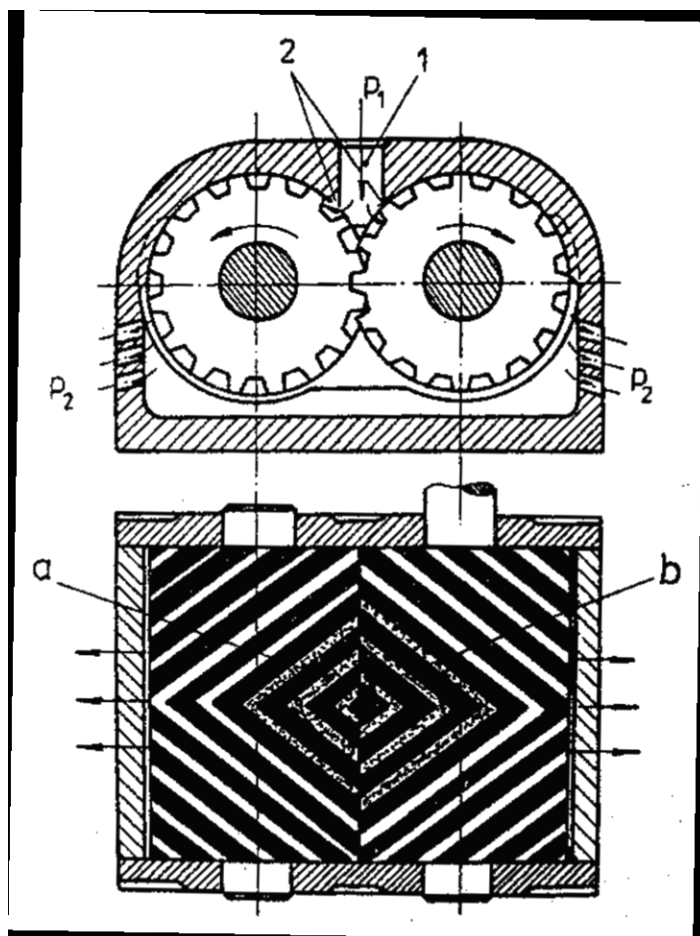
Na Obr. 19 je vzduch přiváděn do motoru o tlaku p_1 . Po vykonání práce je vzduch odveden ven z motoru do výfuku a tím klesne tlak na hodnotu p_2 . Těmito tlakům p_1 a p_2 jsou úměrné velikosti sil F_1 a F_2 , které působí na boky zubu. Na levé ozubené kolo působí síla $F' = F_1 + F_2 - F_2$. Na pravé kolo působí výsledná síla $F'' = F_1 - F_1 - F_2$. Po sečtení sil v jednom smyslu dostaneme výslednou sílu $F = F' + F'' = F_1 + F_2 - F_2 + F_1 - F_1 - F_2 = F_1 - F_2$. Na výslednou kružnici tedy působí výsledná síla a způsobuje tak točivý moment $M = (F_1 - F_2) \cdot R$. [6]



Obr. 19 Princip zubového motoru [6]

Pneumatický motor se šípovými zuby pracuje na principu částečné expanze vzduchu. Obr. 20 představuje princip činnosti tohoto motoru. Otvorem 1 je přiváděn vzduch o tlaku p_1 mezi dva rotory, kde vyplní prostor v zubové mezeře až do místa záběru zubu. Dokud následující zub nepřekryje hranu výstupního kanálu, je zubová mezera zaplňována vzduchem. Expanze vzduchu nastává ve zvětšujících se zubových mezerách při otáčení

motorem. Těsnost mezi zuby a malé vůle mezi patní a hlavovou kružnicí jsou hlavními požadavky pro správnou funkci motoru. [6].



Obr. 20 Ozubení s šípovými zuby [6]

Zubové motory se konstruují s přímými zuby pro nejmenší výkony, se zuby šikmými se vyrábějí pro větší výkony (5 – 15 kW) a se zuby šípovými pro největší možné výkony (15 – 60 kW). Abychom mohli elektrické motory nahradit, pracují tyto motory se jmenovitými otáčkami v rozsahu 1500 až 3000 min^{-1} . [6]

1.3 Pracovní parametry pneumatických rotačních motorů

Pracovní parametry pneumatických motorů jsou určovány možným množstvím energie tlakového vzduchu, které se v pneumatickém motoru využije. V tab. 3 jsou uvedeny parametry při obvyklém pracovním tlaku do 1 MPa takto: [1]

Tab. 3 pracovní parametry pneumotorů [1]

Moment	$M_{max} = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$
Otáčky	$n_{max} = 50\,000 \text{ min}^{-1}$
Výkon	$P_{max} = 60 \text{ kW}$
Spotřeba	$Q_{max} = 65 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Výkon pneumatického motoru je určován geometrickými rozměry pracovních prostorů, středním indikovaným tlakem a otáčkami. [1]

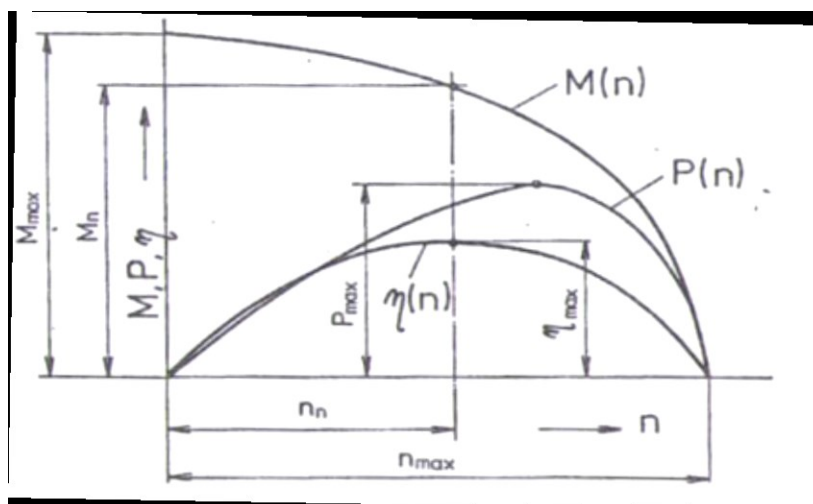
Vlastnosti pneumatických motorů při různých pracovních režimech nejlépe vystihují závislosti momentu, výkonu a spotřeby vzduchu na otáčkách. [1]

1.3.1 Momentová charakteristika motoru v závislosti na otáčkách

Teoretický moment pneumotoru je popsán vztahem

$$M_t = \frac{p_i \cdot V_g}{2 \cdot \pi} \quad (5)$$

kde p_i je střední indikovaný tlak a V_g je geometrický objem pracovních prostorů motoru, který je vztažen na jednu otáčku. Protože ve vztahu pro moment je patrna nezávislost momentu na otáčkách, bude v grafickém vyjádření momentové charakteristiky teoretický moment M_t dán přímkou Obr. 21. [6]



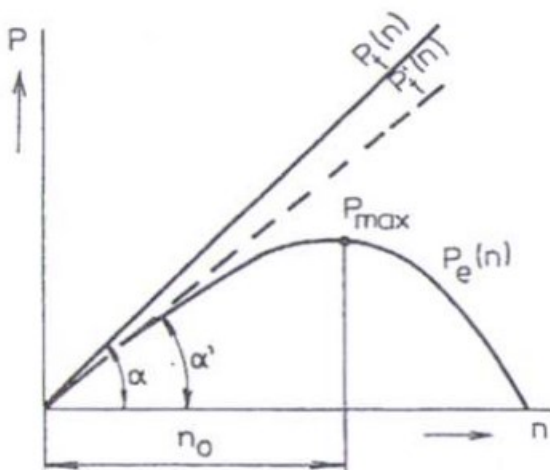
Obr. 21 Momentová charakteristika pneumatického motoru [6]

1.3.2 Výkonová charakteristika motoru v závislosti na otáčkách

Teoretický výkon pneumotoru je popsán vztahem

$$P_t = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \quad (6)$$

kde $V_g = \text{konst.}$ je geometrický objem motoru, n_M jsou otáčky pneumotoru a p_{it} je indikovaný tlak. Pro daný motor je $V_g = \text{konst.}$ a tedy závislost teoretického výkonu na otáčkách při vstupním tlaku $p_1 = \text{konst.}$ a tím i teoretickém indikovaném tlaku $p_{it} = \text{konst.}$ bude přímka, vycházející z počátku souřadnic a mající sklon k ose otáček daný úhel $\alpha = V_g \cdot p_{it}$ Obr. 22. [6]



Obr. 22 Výkonová charakteristika pneumatického motoru [6]

1.3.3 Průtoková charakteristika motoru v závislosti na otáčkách

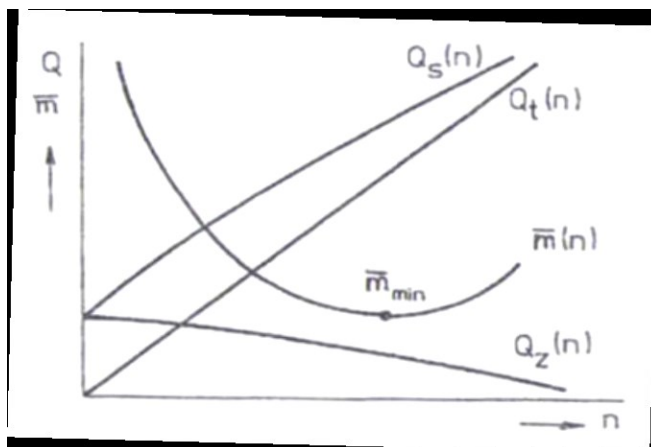
Teoretická spotřeba vzduchu je popsána vztahem

$$Q_t = V_g \cdot n_M \cdot \delta \quad (7)$$

A teoretická spotřeba vzduchu přepočtená na nasávaný tlak je popsána vztahem

$$Q_t = V_g \cdot n_M \cdot \delta \cdot \frac{p_1}{p_{abs}} \quad (8)$$

kde V_g je geometrický objem motoru, n jsou otáčky motoru a δ je stupeň plnění Obr. 23. [6]

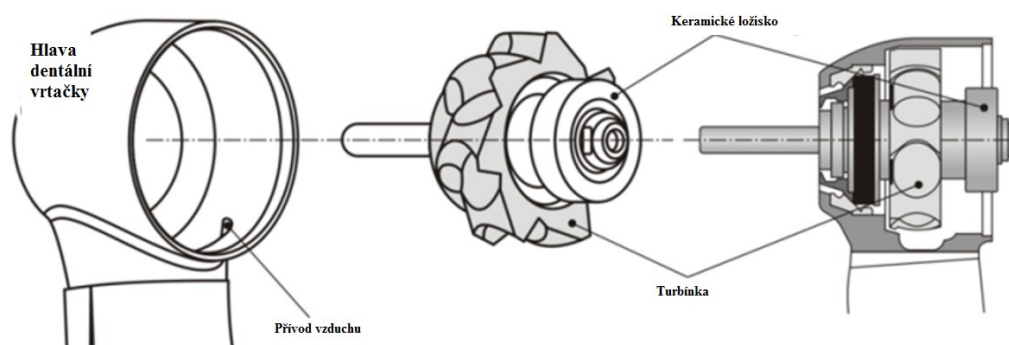


Obr. 23 Průtoková charakteristika pneumatického motoru [6]

1.4 Turbínové motory

Turbínové pneumotory patří do kategorie rychlostních (dynamických) strojů, ve kterých vnitřní i potenciální energie stlačeného vzduchu se mění v kinetickou energii vzduchového proudu, roztáčející pracovní kolo turbíny.

Tohoto pohonu se často také využívá v zubních vrtačkách Obr. 24. Skládá se z přetlakové vzduchové turbíny Obr. 25, která je schopna vyvinout na své malé rozměry překvapivý výkon až 18 W. Její otáčky činí řádově statisíce za minutu ($200\,000 - 400\,000\, \text{min}^{-1}$). [13]



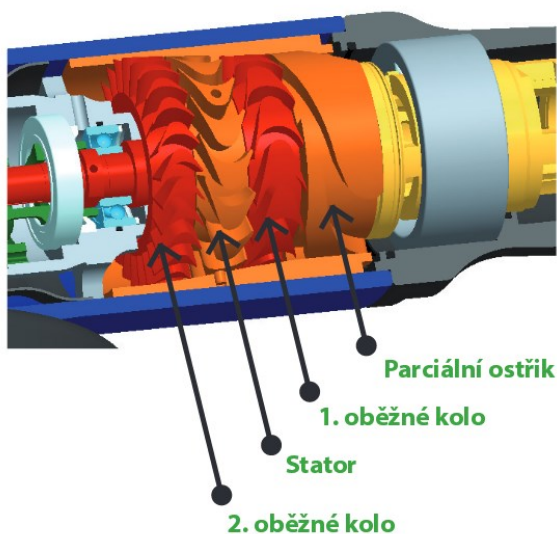
Obr. 24 Turbína dentální vrtačky [4]



Obr. 25 Turbína dentální vrtačky [12]

Na Obr. 26 v parciálním ostříku probíhá přeměna obsažené tlakové energie na energii kinetickou, tzn. tlak je silně redukován a proudí na první oběžné kolo nadzvukovou rychlostí. V prvním oběžném kole se přemění směr proudu vzduchu a předaná energie se mění na rotační pohyb. Vzduch je dále směřován do rozváděcího kola, kde se opět mění jeho směr pro působení energie po směru otáčení prvního oběžného kola a průchodem druhým oběžným kolem dojde k přemístění zbytkové energie na krouticí moment. [2]

Tento princip byl poprvé použit u pneumatického nářadí a zaručuje vysokou efektivitu a výkon velkým počtem otáček. Charakteristika výkonu odpovídá lamelovým motorům, je umožněn provoz bez oleje, neboť oproti lamelovému motoru nedochází v pracovním prostoru k žádnému tření. [2]



Obr. 26 Rovnotlaká turbína Deprag [2]

Například výrobce Deprag se zabývá výrobou turbínových brusek. Turbína využívá expanzi stlačeného vzduchu s vysokou účinností. Díky tomu je dosažena nízká hladina spotřeby vzduchu, pokud tento technický parametr porovnáme se stejně výkonnou lamelovou bruskou. Turbínové brusky nabízí impozantní poměr výkonu k hmotnosti kW/kg. Mají dvojnásobek výkonu při poloviční hmotnosti ve srovnání s pneumatickým lamelovým motorem. Výhodou se jeví velmi nízká hmotnost při srovnání s elektrickým pohonem o stejném výkonu. Konstrukteři firmy DEPRAG vyzdvihují výhody pneumatických turbínových brusek, které jsou ve srovnání s elektrickým nářadím zcela na straně turbínové brusky. Srovnatelná elektrická bruska s výkonem 2 kW a hmotností $6,6\text{ kg}$ nemůže konkurovat turbínové brusce s výkonem $2,2\text{ kW}$ a hmotností menší než 2 kg . Úhlová bruska s turbínovým pohonem firmy DEPRAG disponuje impozantním výkonem $4,5\text{ kW}$ a váží pouhé čtyři kilogramy. $2,2\text{ kW}$ i $4,5\text{ kW}$ turbínové brusky firmy DEPRAG dosahují bezkonkurenčního poměru výkonu k hmotnosti $1,1\text{ kg}$. [11]

1.5 Základní výpočtové vztahy turbínového motoru

Moment na hřídeli turbínového pneumotoru

$$M = \frac{F \cdot D}{2} \quad (9)$$

kde F je síla od výstupu vzduchu trysky na lopatku a D je střední průměr lopatkového kola.

Síla od dynamiky proudícího vzduchu

$$F = Q_m \cdot (C_{u1} - C_{u2}) = Q_V \cdot \rho \cdot (C_{u1} - C_{u2}) \quad (10)$$

kde Q_m je množství vzduchu proudícího v lopatkovém kole ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), $Q_V (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$, $\rho (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$, C_{u1} a C_{u2} jsou tangenciální rychlosti na vstupu a výstupu z lopatkového kola ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tento vztah můžeme také popsat

$$F = 2 \cdot Q_m \cdot (C_{u1} - u) \quad (11)$$

kde parametr u lze spočítat vztahem

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (12)$$

Moment na hřídeli lopatkového kola je dán vztahem

$$M_t = D \cdot Q_m \cdot (C_{u1} - u) = D \cdot Q_v \cdot \rho \cdot \left(C_{u1} - \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \right) \quad (13)$$

Teoretický výkon na lopatkovém kole je popsán vztahem

$$P_t = \frac{M \cdot n}{60} = \frac{D \cdot M \cdot n}{60 \cdot 10^4} \cdot \left(C_{u1} - \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \right) \quad (14)$$

Skutečný výkon je závislý na účinnosti oběžného kola.

Spotřeba vzduchu je popsána vztahem

$$Q_m = \frac{P_t \cdot \eta_c}{L_{ad}} \quad (15)$$

Spotřeba vzduchu závisí na takzvané adiabatické práci L_{ad} , která je popsána vztahem

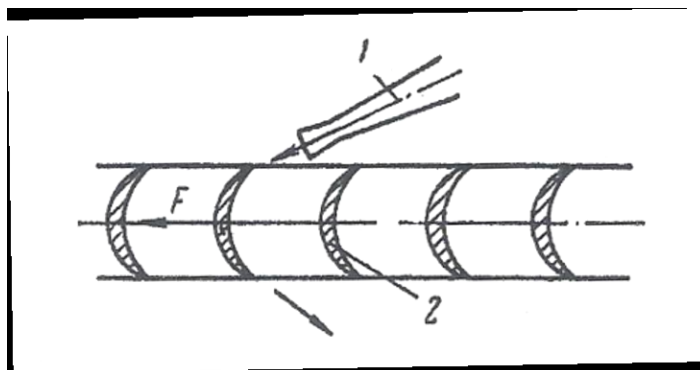
$$L_{ad} = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_o \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (16)$$

1.6 Princip práce turbínového pneumotoru

Stlačený vzduch z rozvodné sítě je veden do nepohyblivé trysky 1 Obr. 27, ve které se jeho tlaková energie mění v kinetickou energii. Proud vzduchu za tryskou je veden na lopatky 2 pracovního kola. V důsledku vzájemného působení dynamiky proudu vzduchu a lopatek pracovního kola vzniká síla F , způsobující otáčení kola.

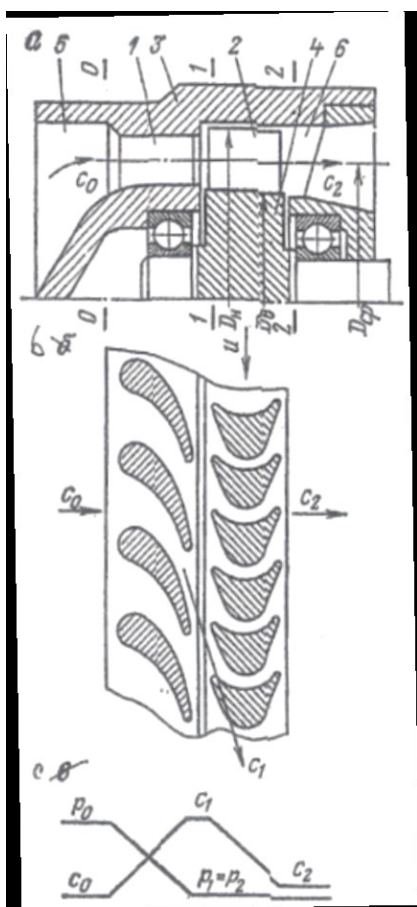
Přeměna energie může mít charakter akční, nebo reakční. U akčního principu dochází k expanzi pouze v trysce a při průtoku lopatkami kola je tlak konstantní a dochází k přeměně jen kinetické energie proudícího vzduchu - $\frac{v^2}{2}$ na mechanickou energii. U reakčního typu turbínových pneumotorů je expanze vzduchu rozdělena mezi trysku a lopatky kola, vyžaduje

vyšší vstupní tlak vzduchu, což má řadu nevýhod (těsnost mezi lopatkovými prostory) a nedoznala tak u turbinových pneumotorů rozšíření.

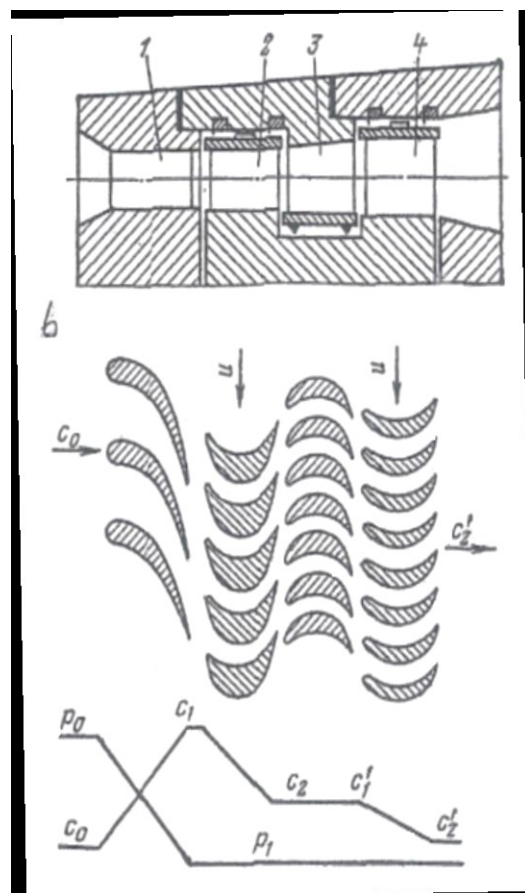


Obr. 27 Jednostupňový princip.

Z konstrukčního hlediska se používá buď jednostupňový princip (tryska a jedno lopatkové kolo) Obr. 28 nebo dvoustupňový princip (tryska, dvě oběžná lopatková kola a mezi nimi pevné lopatkové kolo) Obr. 29.



Obr. 28 Jednostupňový princip



Obr. 29 Dvoustupňový princip

1.7 Výhody a nevýhody turbínových pneumotorů

U turbínového pohonu se ještě výrazněji projeví výhody vysokého využití výstupního výkonu při malé hmotnosti.

1.7.1 Výhody turbínových pneumotorů oproti pneumotorům objemového typu (pístové, lamelové, zubové)

- Srovnatelně jednodušší konstrukční koncepce (jedinou pohyblivou částí je jedno či dvou lopatkové kolo). Výrobně je to zpravidla odlitek z lehké slitiny nebo plastu. Možnost vyrábět v sériové výrobě.
- Malé rozměry a hmotnost, přizpůsobivost aplikacím jako jsou např. vrtačka nebo bruska.
- Provozní spolehlivost, provoz bez tření, není nutno mazat, minimální počet součástí.
- Stabilita pracovních charakteristik motoru nepodléhající opotřebení, startovací moment ($n=0$) je až 2 krát vyšší než u max. výkonu, který je asi v polovině max. otáček.

1.7.2 Nevýhody turbínových pneumotorů oproti pneumotorům objemového typu (pístové, lamelové, zubové)

- Vysoký počet otáček – až 400 tisíc, je nutno redukovat až 3 stupňovým planetovým převodem.
- Nutnost regulovat otáčky (mechanicky odstředivý regulátor).
- Není možné použít reverzaci otáček.

Tab. 4 Mechanické účinnosti pneumotorů [1]

Mechanické účinnosti jednotlivých rotačních motorů	
Lamelové motory	$\eta_m=0,8$ až $0,9$
Pístové Motory	$\eta_m=0,85$ až $0,9$
Zubové motory	$\eta_m=0,9$ až $0,95$
Turbínové motory	$\eta_m=0,93$ až $0,95$

2. Aplikace pneumatických rotačních motorů v pohonech strojů

Bylo již uvedeno, že pneumatického pohonu strojů a zařízení se používá ve srovnání s jinými typy pohonů, poměrně málo. Přesto, že možnosti pneumatického pohonu jsou

omezené, je možno vyjmenovat celou řadu aplikací, kde pneumatické pohony jsou používány s úspěchem a kde mají pro své nesporné výhody svou perspektivu. Pneumatické motory jsou vhodné pro všechny průmyslové odvětví, jako jsou např. [1]

- potravinářství,
- manipulace s materiálem,
- balící stroje,
- zdravotnictví,
- dopravní prostředky,
- zemědělství,
- ruční nářadí,
- textilní a papírenský průmysl.

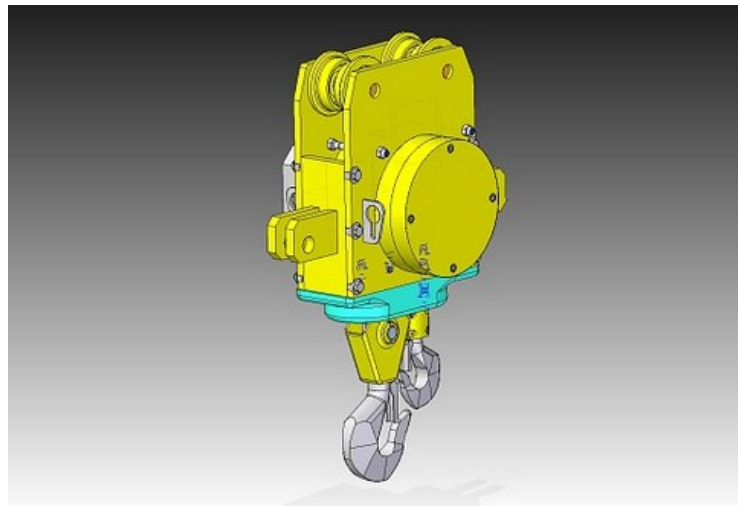
Jejich použití bude účelné především tam, kde je stávající rozvod stlačeného vzduchu dostatečně dimenzován. Jsou to především provozy hlubinných dolů, ražení štol a tunelů, slévarenské provozy, některé provozy chemických závodů, plynárenských provozů a vůbec provozů s nebezpečným výbuchem prachu, plynu, chemických koncentrací. [1]

2.1. Aplikace podle typů motorů

Nespočet variant provedení, jednoduchá zástavba, nízká hmotnost, vysoký rozsah otáček, možnost použití v prostředí s nebezpečím výbuchu, to vše zajišťuje pneumatickým motorům široké spektrum použití. Pneumatické motory lze například najít ve strojích, jako jsou dopravníky, lanové vrátky, transportní zařízení, nakládací zařízení, míchadla nebo také u ručního nářadí, kde můžeme zahrnout sbíječky, vrtací a bourací kladiva, utahováky, brusky a vrtačky. V následující podkapitole uvedu některé typy těchto strojů a nářadí podle druhu pneumatického rotačního motoru. [16]

2.1.1. Pístové pneumatické rotační motory

Pístové manipulační zařízení Obr. 21 slouží k vertikálnímu zvedání a spouštění břemene na závěsné drážce v místech s možností přívodu stlačeného vzduchu. Zařízení se skládá ze základních částí jako je pneumatický pístový motor a nosný vozík. [15]



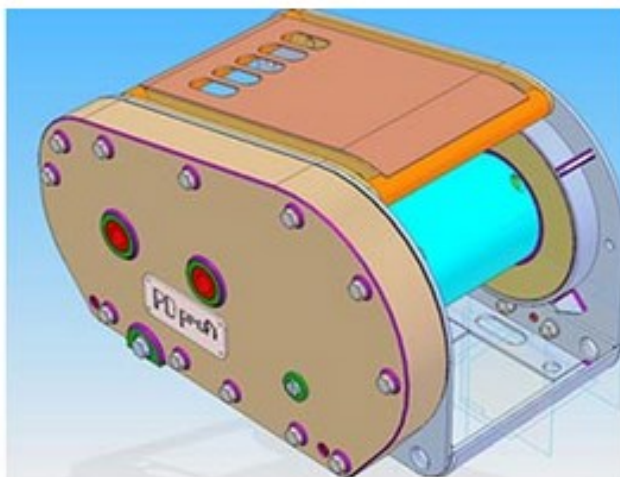
Obr. 21 Pneumatické manipulační zařízení ZMPP 1,6t/3,2t [9]

Tab. 5 Parametry manipulačního zařízení [15]

Rychlost zdvihu	$0,5 - 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Pracovní tlak	$0,4 - 0,6 \text{ MPa}$
Výkon	2 kW
Spotřeba vzduchu	$37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

2.1.2. Zubové pneumatické rotační motory

Zubové manipulační zařízení Obr. 22 se používá k dopravě a přemísťování materiálu, strojů a jejich částí v dolech na vodorovných tratích. Mezi jeho základní části patří rám vrátku s bubnem, zubový pneumatický motor a ovladač s pneumatickým rozvodem. [15]



Obr. 22 Pneumatický vlečný vrátek VVP 10 [15]

Tab. 6 Parametry manipulačního zařízení [15]

Rychlost lana	$0,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Pracovní tlak	$0,4 \text{ MPa}$
Výkon	$3,2 \text{ kW}$
Spotřeba vzduchu	$350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

2.1.3. Lamelové pneumatické rotační motory

Pneumatické odstředivé čerpadlo CPO 40 Obr. 23 je určeno pro čerpání čisté a mírně znečištěné vody s velikostí zrna do 5 mm. Jsou určena pro prostředí, kde je pravděpodobnost vzniku výbušné atmosféry a kde je k dispozici jako pohonné médium stlačený vzduch. Především tedy v podzemních částech hlubinných dolů a povrchových instalacích těchto dolů s pravděpodobností vzniku ohrožení metanem nebo hořlavým prachem. [15]



Obr. 23 Pneumatické odstředivé čerpadlo CPO 40 [15]

Tab. 7 Parametry manipulačního zařízení [15]

Průtok – max.	$6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$
Tlak vzduchu	$0,4 - 0,6 \text{ MPa}$
Příkon	3 kW
Dopravní výška	40 m

Pneumatický kladkostroj Obr. 24 se skládá z tělesa a hákové soupravy, lamelového motoru a pneumatického ovladače. Používá se jako klasické stabilní zdvihadlo ke zvedání a spouštění břemene, kde je k dispozici zdroj stlačeného vzduchu. [15]



Obr. 24 Pneumatický kladkostroj PL 0,25t a 0,5t [15]

Tab. 8 Parametry manipulačního zařízení [15]

Rychlost lana	$0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Pracovní tlak	$0,4 - 0,6 \text{ MPa}$
Výkon	$0,8 \text{ kW}$

Pneumatický násobič momentu NMP 3200 Obr. 25 slouží k povolování a utahování šroubových spojů v těžkém průmyslu. Utahovací moment je vyvolán pomocí lamelového motoru, který přenáší krouticí moment přes planetové převody na výstupní unášec. Nastavení utahovacího momentu se provádí regulací přívodního tlaku. Násobič neobsahuje slitiny z lehkých kovů a je možno ho použít do prostředí s nebezpečím výbuchu. [15]



Obr. 25 Pneumatický násobič momentu NMP 3200 [15]

Tab. 9 Parametry ručního nářadí [15]

Krouticí moment	523 – 10 116 $N \cdot m$
Pracovní tlak	0,3 – 0,63 MPa
Výkon	2,6 – 5 KW
Spotřeba vzduchu	1,1 $m^3 \cdot min^{-1}$

2.1.4. Turbínové pneumatické rotační motory

Pneumatická vrtačka Obr. 26 nalezne využití při ručním vrtání s vrtací tyčí osazenou vrtací korunkou. Ideální nářadí pro vrtání do měkkého a středně tvrdého uhlí, lupku nebo jiných měkkých hornin. Vrtačka zaručuje efektivní a hospodárnou práci v průmyslovém použití v nepřetržitém provozu, i v prostředí s nebezpečím výbuchu. Hlavní technickou odlišností oproti konkurenčním vrtačkám je použití turbínového motoru. Druhým ojedinělým prvkem této vrtačky je použití řemenu v první části převodu pro utěsnění olejové náplně při vysokých rychlostech. [15]



Obr. 26 Turbínová pneumatická vrtačka DPT 450-011BXOEX [15]

Tab. 10 Parametry ručního nářadí [15]

Krouticí moment	45 $N \cdot m$
Pracovní tlak	0,4 – 0,6 MPa
Výkon	4,5 KW
Spotřeba vzduchu	1,25 $m^3 \cdot min^{-1}$
Max. otáčky	1100 min^{-1}

Mezi nejdůležitější výhody turbínové brusky Obr. 27 patří provoz bez nutnosti přimazávání stlačeného vzduchu, maximální úběr materiálu, dvojnásobný výkon v porovnání s konvečními bruskami s lamelovým motorem. Perfektní ovládání rukojetí ergonomického tvaru, rukojeť pro tlumení vibrací, atd.. Perfektní pro aplikace v stísněných prostorech.



Obr. 27 Pneumatická bruska GAT 812-221BX [14]

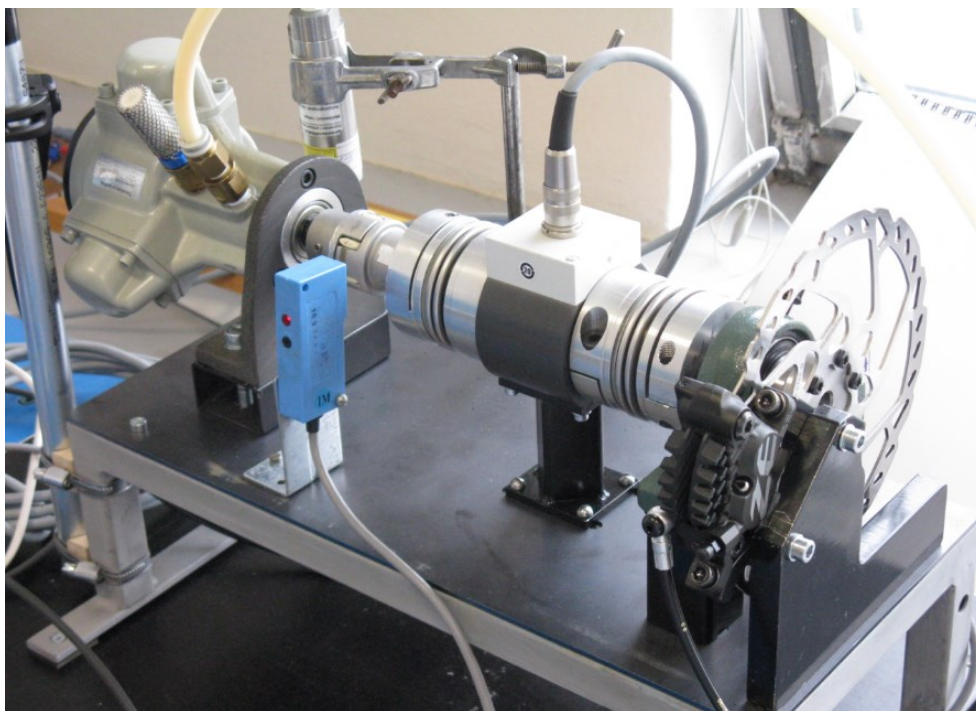
Tab. 11 Parametry ručního nářadí [14]

Obvodová rychlost	$80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Pracovní tlak	$0,63 \text{ MPa}$
Výkon	$2,2 \text{ KW}$
Spotřeba vzduchu	$0,56 - 2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Max. otáčky	$12\,000 \text{ min}^{-1}$

3. Úvod do problematiky měření momentové a výkonové charakteristiky

Úkolem této bakalářské práce je vypracování návrhu experimentu a ověřit měření momentové a výkonové charakteristiky pneumatického rotačního motoru.

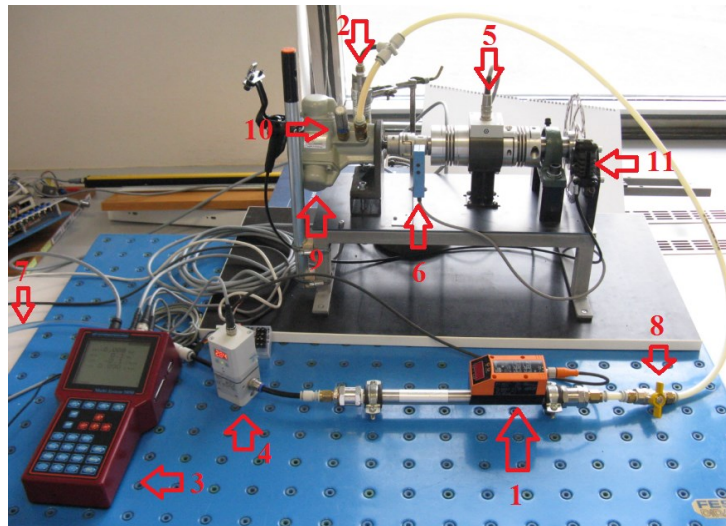
V laboratoři VŠB jsem využil již sestaveného měřicího zařízení Obr. 27, kde je použit pneumatický radiální pístový motor, který je pro účely ověření charakteristik brzděn pomocí brzdového kotouče horského kola a k vytvoření odporu je zde použita ručně ovládaná hydraulická brzda. Z tohoto experimentu lze určit momentovou a výkonovou charakteristiku použitého pneumatického rotačního motoru.



Obr. 27 Zkušební zařízení s využitím pneumatické rotačního motoru

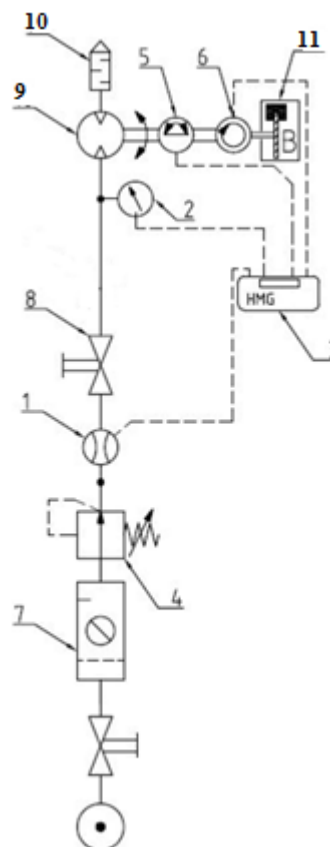
3.1. Měřicí obvod

Zkušební zařízení se skládá z několika součástí Obr. 28. Na 7 je zaznačen přívod vzduchu do obvodu přes jednotku úpravy stlačeného vzduchu. Vzduch dále proudí přes proporcionální redukční ventil 4, který udržuje zadaný konstantní tlak vzduchu v obvodu. Dále pak následuje průtokoměr tlakového vzduchu 1, který měří průtok vzduchu obvodem. Vzduch dále proudí přes sériově zapojený tlakový snímač 2, který nám ukazuje tlak v obvodu, na radiální pístový motor 9. Tento pneumatický motor roztáčí hřídel, na které je umístěn snímač otáček hřídele 6 a snímač krouticího momentu 5 a dále pak i brzdový kotouč 11. Výstupní hodnoty ze snímačů krouticího momentu, otáček, tlaku a průtoku nám zpracovává přístroj zvaný HYDROTECHNIK Multi System 5050 3.



Obr. 28 Zkušební zařízení

3.2. Schéma měřicího obvodu



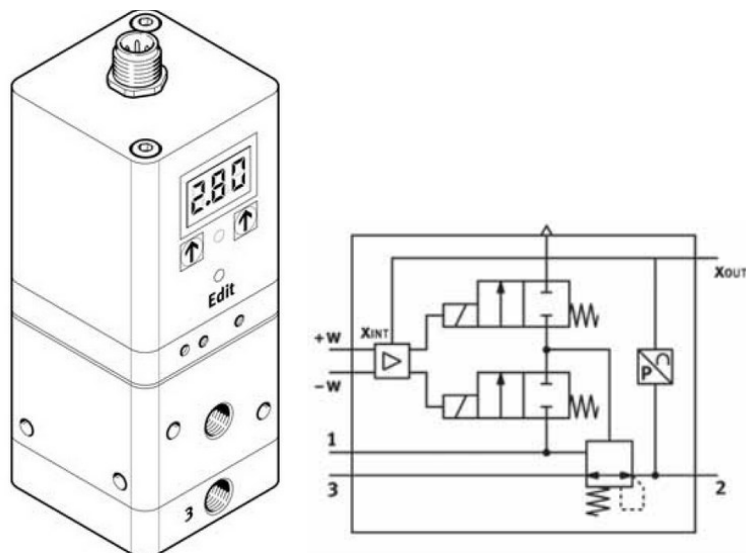
Obr. 29. Schéma měřicího obvodu

1 - Průtokoměr, 2 - Snímač tlaku, 3 - Záznamové zařízení, 4 - Proporcionální redukční ventil, 5 - Snímač krouticího momentu, 6 - Fotoelektrický snímač otáček, 7 - Jednotka pro úpravu stlačeného vzduchu, 8 - Kulový ventil, 9 - Pneumatický rotační motor, 10 - Tlumič hluku, 11 - Hydraulická brzda

3.3. Popis jednotlivých součástí pneumatického obvodu

Proporcionální redukční ventil VPPE-3-1-1/8-10-010-E1

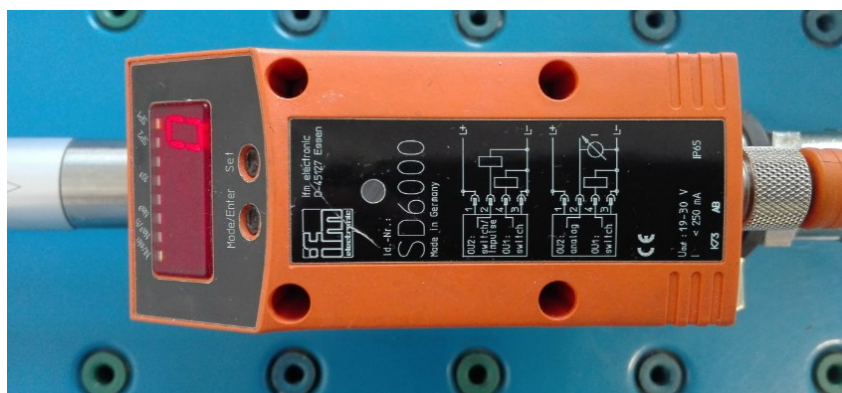
Jedná se o proporcionální redukční ventil s displejem a regulačním rozsahem od $p = 0,01 \text{ MPa}$ a do $p = 1 \text{ MPa}$ Obr. 30.



Obr. 30 Proporcionální redukční ventil [18]

Průtokoměr SD6000

Pracuje na principu snímání teploty rozžhaveného drátu, který je ochlazován proudícím vzduchem. Tlakový rozsah je $0 \div 1,6 \text{ MPa}$ a výstupní signál je $4 \div 20 \text{ mA}$. Maximální průtok činí $Q = 1250 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a přesnost $\pm 3,3 \%$ Obr. 31.



Obr. 31 Průtokoměr SD6000 [19]

Snímač tlaku – Hydrotechnik PR15

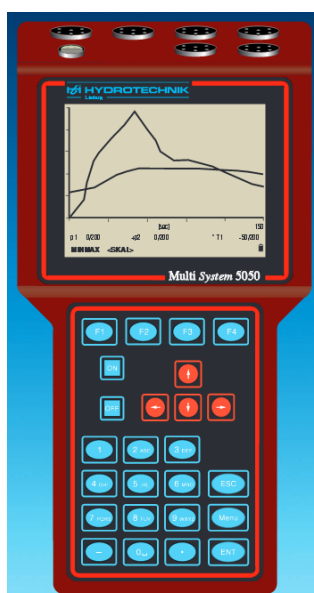
Měřicí rozsah je $0,1 \div 0,6 \text{ MPa}$ a výstupní signál je $4 \div 20 \text{ mA}$. Přesnost $\pm 0,2 \%$ z výsledné hodnoty Obr. 32.



Obr. 32. Snímač tlaku [20]

Záznamové zařízení – Hydrotechnik, model M5050

Hydrotechnik Multi-System 5050 je výkonný měřicí přístroj, lehce řízený ruční měřicí přístroj pro všechny typy fyzikálních veličin. Nabízí 2 frekvenční vstupy a 4 analogové vstupy, volně volitelné uživatelem. Frekvenční zásuvky mohou být použity pro snímač s výstupním signálem mezi 3,5 a 30 V. Může být použita analogová zásuvka pro senzory se standardním výstupním signálem mezi 0 a 20 mA, nebo 4 až 20 mA nebo napěťovým signálem mezi 0 a 10 VDC Obr. 33.



Obr. 33. Hydrotechnik M5050 [21]

Pneumatický radiální pístový rotační motor - Parker, P1V-P012F01800

$P_{max} = 125 \text{ W}$ při tlaku $p = 0,5 \text{ MPa}$ a otáčkách $n = 900 \text{ min}^{-1}$ Obr. 34



Obr. 34 Pneumatický radiální pístový motor – PARKER [7]

Snímač krouticího momentu - HBM, model T22/50Nm

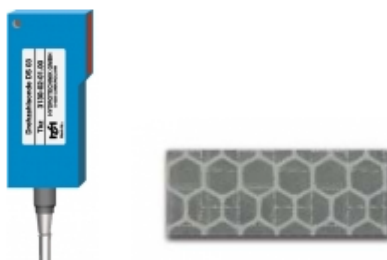
použití T22 jako převodník který umožňuje přímé připojení k PLC. Napájení 11,5 V až 30 V DC a má dva $\pm 5 \text{ V}$ a $10 \pm 8 \text{ mA}$ analogové výstupy poskytují základ pro připojení k PLC. Obr. 35



Obr. 35 Snímač krouticího momentu [22]

Snímač otáček RS110 (DS03)

infračervený senzor RPM pro použití s měřicími přístroji HYDROTECHNIK. Dodává se s samolepící odrazovou folií. Obr. 29



Obr. 36 Snímač otáček s odrazovou folií [20]

3.4. Popis navrhovaného experimentu

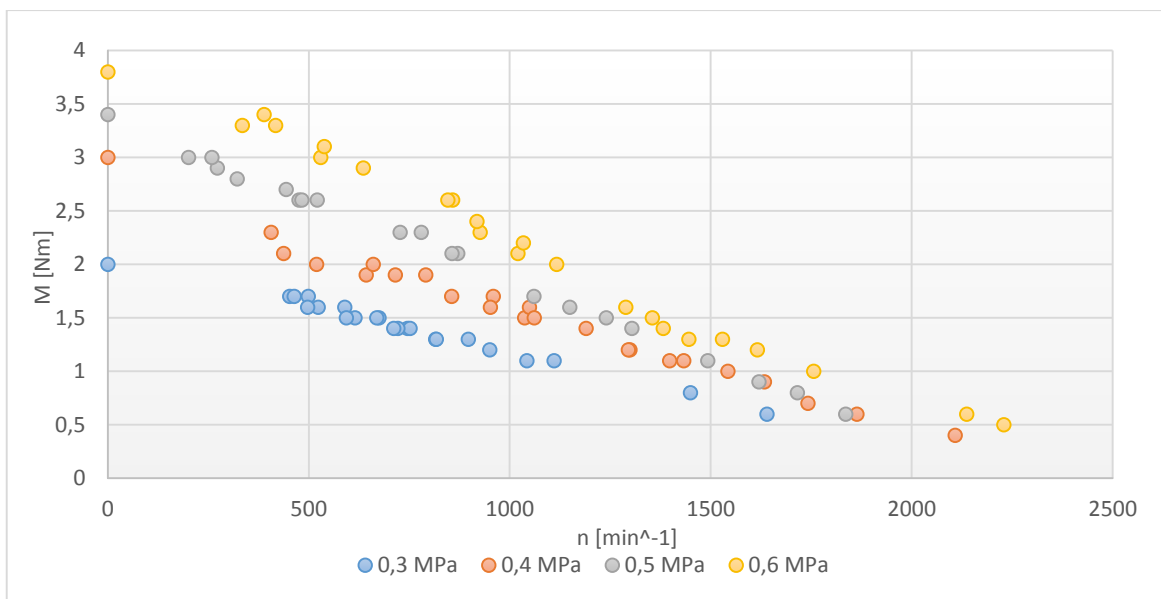
Do pneumatického obvodu je přiveden vzduch pomocí kompresoru, který obvod natlakuje. Pomocí proporcionálního redukčního ventilu nastavíme konstantní hodnoty tlaku. Měření bylo prováděno pro $p = 0,3 - 0,6 \text{ MPa}$. Tlak v obvodu je kontrolován pomocí snímače tlaku, který je zapojen v obvodu mezi průtokoměrem a pneumatickým motorem. Velikost otáček pneumatického motoru závisí na lidské síle zmáčknutí ruční hydraulické brzdy a tím vyvozením odporu na brzdovém kotouči, který je spojen hřídelí s pneumatickým motorem. Pro rychle odpojení přívodu stlačeného vzduchu je v obvodu zakomponován kulový ventil. Dále v obvodu je také zapojen i snímač průtoku s displejem zobrazující okamžitý průtok. Na konci pneumatického obvodu se nachází pneumatický radiální pístový motor značky PARKER a označením P1V-P012F01800, kde na vstup tohoto pneumotoru je přiveden konstantní tlak a tím je motor uváděn do pracovního chodu. Na výstupní hřídeli pneumotoru je umístěná spojka, která spojuje pneumotor s brzdovým kotoučem. Na této spojce je připevněna odrazová folie umožňující snímat rychlost otáčení pomocí snímače a dále je zde také zakomponován snímač krouticího momentu. K zobrazení okamžitých otáček, krouticího momentu, tlaku v pneumatickém obvodu a průtoku vzduchu jsou tyto snímače připojeny k vyhodnocovacímu zařízení Multi System Hydrotechnik M5050. Hydraulická brzda s brzdovým kotoučem bude vytvářet brzdový moment na pneumotoru, ke kterému bude docházet pomocí stlačování páčky hydraulické brzdy, a tím budeme vytvářet zátěž na pneumotoru. Z důvodu malé vzdálenosti jsou v pneumatickém obvodu všechny ztráty zanedbány.

Výkon se spočítá z rovnice (17) na základě odečtených hodnot z použitých snímačů (moment, otáčky)

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (17)$$

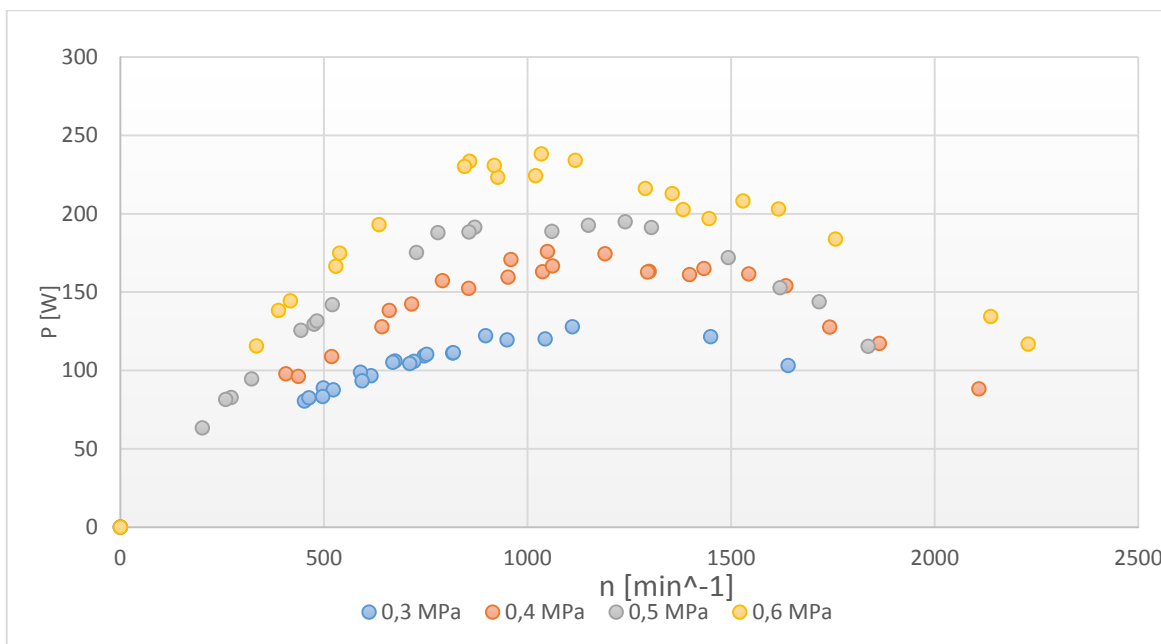
Všechny získané naměřené hodnoty se zpracují do tabulek a následně vyhodnotím pomocí programu Microsoft Excel.

Obr. 37 nám znázorňuje závislost krouticího momentu na okamžitých otáčkách. Bržděním pneumatického motoru (zvětšením zátěže) dochází k poklesu otáček ale zároveň ke zvýšení krouticího momentu. Z toho vyplývá, že čím více pneumotor zatížíme, tím větší budeme mít krouticí moment a tím nižší otáčky, jak je vidno z grafu. Měření momentové charakteristiky bylo provedeno při různých hodnotách vstupních tlaků.



Obr. 37 Závislost krouticího momentu na otáčkách

Obr. 38 nám znázorňuje závislost výkonu na okamžitých otáčkách. S brzděním pneumatického motoru se nám zvětšuje výkon, avšak klesají otáčky. Při zvyšování zátěže se dostal výkon při určitých otáčkách na svou maximální hodnotu. Po překonání těchto otáček, kdy výkon dosáhl své maximální hodnoty, se začal výkon razantně snižovat. Měření momentové charakteristiky bylo provedeno při různých hodnotách konstantních tlaků. Výkon tohoto pneumatického motoru jsem spočetl pomocí vzorce (17). Výkonová charakteristika má parabolický průběh.



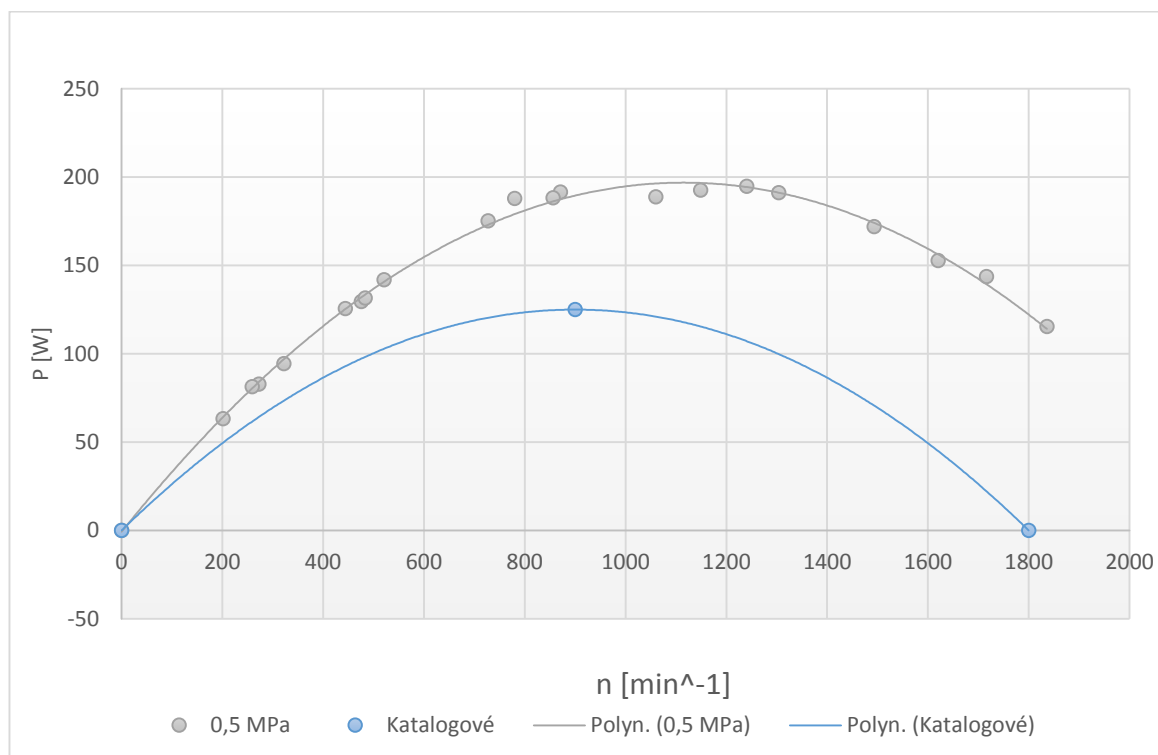
Obr. 38 Závislost výkonu na otáčkách

4. Srovnání charakteristik uvedených v katalogu výrobce s naměřenými charakteristikami

Parametry pneumatického motoru P1V-P012F01800 od firmy Parker pro konstantní tlak $p = 0,5 \text{ MPa}$ jsou uvedené v tab. 11. Tyto parametry porovnáme s výsledky průběhu momentové a výkonové charakteristiky.

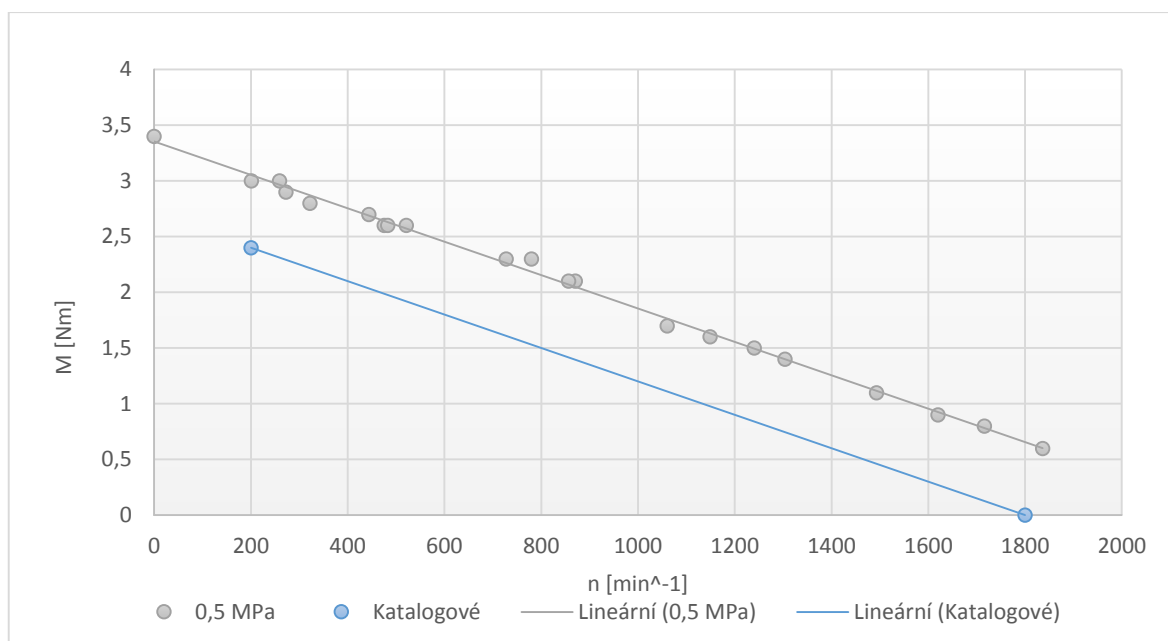
Tab. 11 Parametry pneumatického motoru pro konstantní tlak 0,5 MPa

Max. výkon	Otáčky při max. výkonu	Moment při max. výkonu	Min. startovací moment	Moment při rozběhu	Spotřeba vzduchu při max. výkonu
kW	min^{-1}	Nm	Nm	Nm	$dm^3 s^{-1}$
0,125	900	1,37	1,96	2,94	4,34



Obr. 39 Výkonová charakteristika

Obr. 39 výkonové charakteristiky nám znázorňuje parabolické průběhy katalogové a naměřené křivky při konstantním tlaku 0,5 MPa. Z grafu jde vidět, že křivky jsou dosti rozdílné. Křivka naměřených hodnot ukazuje nejvyšší výkon $P = 195 \text{ W}$ při otáčkách $n = 1240 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 40 Momentová charakteristika

Obr. 40 momentové charakteristiky nám znázorňuje lineární průběhy katalogové a naměřené přímky při konstantním tlaku $0,5 \text{ MPa}$. Z grafu jde vidět, že přímky jsou rovnoběžné, avšak přímka naměřených hodnot ukazuje vyšší krouticí moment se snižujícími se otáčkami, než uvádí výrobce v katalogu. Naměřená a vypočtená data, která byla využita pro tvorbu charakteristik, jsou uvedena v příloze této práce.

5. Závěr

Na začátku své práce jsem vypracoval přehled výhod a nevýhod použití pneumatických rotačních motorů. Vzhledem k tomu, že existuje mnoho konstrukčních provedení těchto motorů, uvedl jsem dále jejich rozdělení, princip činnosti, základní výpočtové vztahy a hlavní parametry. Krátce se věnuji také vlastnostem uvedených motorů, které nejlépe vystihuje momentová, výkonová a průtoková charakteristika. Dále jsou na konkrétních aplikacích uvedeny možnosti využití pneumatických rotačních motorů v pohonech strojů a ručního nářadí.

V závěru práce je uveden popis experimentálního zařízení, pro měření momentové a výkonové charakteristiky rotačního pneumatického motoru. Na tomto zařízení bylo realizováno měření radiálního pístového motoru PARKER P1V-P012F01800. Je zde uvedena specifikace jednotlivých použitých prvků a metodika měření. Výsledkem jsou momentové a výkonové charakteristiky pro čtyři konstantní hodnoty vstupního tlaku. Následuje porovnání naměřených charakteristik s charakteristikami uvedenými v katalogu výrobce daného motoru. Z výsledných grafů je evidentní, že naměřené hodnoty jsou větší, než uvádí katalog výrobce a to zřejmě z důvodu, aby výrobce zajistil stoprocentní spolehlivost získání maximálního výkonu.

6. Seznam použité literatury

[1] KOPÁČEK, J. *Pohony a převody*. 2. vyd. [i.e. 3. vyd.]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2780-3.

[2] *DEPRAG* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
http://www.deprag.cz/files/products/ostatni_dokumenty/Vyhody%20pneu_cz.pdf

[3] *Industrial automation* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
<http://pt.slideshare.net/CharltonInao/industrial-automation-pe-5421-weeks-2-3-4-10-20-2015>

[4] *Application Possibilities of Rotary Pneumatic Drives Using* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ajme/3/6/25/>

[5] *Úvod do pneumatiky: ucebnice FESTO Didactic: urceno pro stud. postgrad. studia fak. strojní*. 1. vyd. Praha: CVUT, 1989. 197 s. ISBN 80-01-00042-7.

[6] KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 80-7078-306-0.

[7] *PARKER* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
<https://www.parker.com/literature/Pneumatics%20Division%20Europe/PDE-Documents/Radial%20Piston%20Air%20Motor%20-%20P1V-P%20Series%20-%20Catalogue%20PDE2538TCUK.pdf>

[8] *DEPRAG* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
http://www.deprag.com/fileadmin/bilder_content/emedi/broschueren_pics/emedi_druckluftmotoren/D6000/D6000en.pdf

[9] *PARKER* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
<https://www.parker.com/literature/Pneumatics%20Division%20Europe/PDE-Documents/P1V-S%20Vane%20Air%20Motor%20Stainless%20Steel%20Series%20-%20Catalogue%20PDE2554TCUK.pdf>

[10] *DEPRAG* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
<http://www.deprag.com/cz/pneumaticke-motory/technische-informationen/regelung.html>

- [11] *DEPRAG* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
<http://www.deprag.cz/cz/novinky/tiskove-zpravy/turbinove-brusky/>
- [12] Midwest Tradition "L" Turbine. *Amerdental*. [online]. 2008 [cit. 2014-05-21].
Dostupné z: <https://www.amerdental.com/turbines-handpieces-and-dental-parts/midwesttradition-latch-auto.html>
- [13] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-05]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Zubn%C3%AD_vrta%C4%8Dka
- [14] *Katalog deprag* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: www.deprag.com
- [15] *Katalog PD PROFI* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: www.pdprofi.cz
- [16] *AUTOMA* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:
http://automa.cz/index.php?id_document=27904
- [17] BEATER, Peter. *Pneumatic drives: system design, modelling and control*. London: Springer, 2007. ISBN 3540694706.
- [18] *FESTO* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:
https://www.festo.com/cat/lv_lv/data/doc_engb/PDF/EN/VPPE_EN.PDF
- [19] *APOELMOS* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:
<http://www.apoelmos.cz/products/plovackove-turbinove-a-jine-prutokomery-138000/sd6000-sd6001-hlidace-spotreby-tlakoveho-vzduchu-dn15/>
- [20] *Katalog Flowtechnik* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:
www.ukflowtechnik.com
- [21] *HYDROTECHNIK* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:
http://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user_upload/Manuals/Messtechnik_MultiSystem_5050_BAL_ENG.pdf
- [22] *HBM* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.hbm.com/en/2384/t22-torque-transducer-for-simple-torque-applications/>

Přílohy

Měření pro 0,3 MPa				
	M	Q	n	P
	$N \cdot m$	$dm^3 \cdot min^{-1}$	min^{-1}	W
1	2	31,9	0	0
2	1,7	115,5	452,3	80,5
3	1,7	125,4	498,9	88,8
4	1,6	130,7	523,2	87,7
5	1,7	117	463,4	82,5
6	1,5	147	615,4	96,7
7	1,6	144,2	589,7	98,8
8	1,6	124,2	497,4	83,3
9	1,5	144,9	593,4	93,2
10	1,5	158,8	674,6	106,0
11	1,4	173,2	745,8	109,3
12	1,3	182,8	815,8	111,1
13	1,4	174,3	752,2	110,3
14	1,5	1558,9	669,3	105,1
15	1,4	167	721,4	105,8
16	1,3	187,5	817,4	111,3
17	0,6	292,1	1640	103,0
18	0,8	272,4	1450	121,5
19	1,3	196,9	896,9	122,1
20	1,2	205,9	950,1	119,4
21	1,1	219,8	1043	120,1
22	1,1	228,8	1110	127,9

Měření pro 0,4 MPa				
	M	Q	n	P
	$N \cdot m$	$dm^3 \cdot min^{-1}$	min^{-1}	W
1	3	38,3	0	0,0
2	2,3	134	406,3	97,9
3	2,1	150,6	437,3	96,2
4	2	171,9	519,2	108,7
5	1,9	199,4	642,8	138,3
6	2	202,7	660,3	142,3
7	1,9	216,1	715,3	157,3
8	1,9	230	790,8	152,3
9	1,7	244,5	855,6	170,8
10	1,7	263,9	959,4	159,5
11	1,6	260,6	951,9	162,9
12	1,5	275,2	1037	175,8
13	1,6	277,6	1049	166,7
14	1,5	280,3	1061	174,5
15	1,4	300,4	1190	163,2
16	1,2	317,3	1299	162,7
17	1,2	317,2	1295	161,0
18	1,1	333,4	1398	165,1
19	1,1	340,4	1433	161,6
20	1	354,3	1543	154,0
21	0,9	365,1	1634	127,7
22	0,7	381,7	1742	117,1

Měření pro 0,5 MPa				
	M	Q	n	P
	$N \cdot m$	$dm^3 \cdot min^{-1}$	min^{-1}	W
1	3,4	70,8	0	0,0
2	2,9	132,7	272,6	82,8
3	3	129,3	259,2	81,4
4	3	77,7	201,2	63,2
5	2,8	150,7	322,2	94,5
6	2,6	201	475,5	129,5
7	2,7	190	443,9	125,5
8	2,6	202,8	483	131,5
9	2,6	213,4	520,9	141,8
10	2,3	278,4	779,7	187,8
11	2,3	266,6	727,3	175,2
12	2,1	298,2	870,6	191,5
13	2,1	394,6	856,3	188,3
14	1,6	240,8	1149	192,5
15	1,7	325,8	1060	188,7
16	1,5	351,2	1240	194,8
17	1,4	360,8	1304	191,2
18	1,1	383,5	1493	172,0
19	0,9	394,8	1620	152,7
20	0,8	404,4	1716	143,8
21	0,6	415,1	1836	115,4

Měření pro 0,6 MPa				
	M	Q	n	P
	$N \cdot m$	$dm^3 \cdot min^{-1}$	min^{-1}	W
1	3,8	77,9	0	0
2	3	255,2	529,6	166,4
3	3,3	184,2	334,6	115,6
4	3,4	207,9	388,5	138,3
5	3,3	217,9	417,6	144,3
6	3,1	258,8	538,7	174,9
7	2,9	287,6	635,6	193,0
8	2,7	278,8	601,4	170,0
9	2,6	351	857,6	233,5
10	2,6	347,9	845,6	230,2
11	2,3	364,3	926,7	223,2
12	2,4	362,5	918,3	230,8
13	2,1	381,1	1020	224,3
14	2,2	383	1034	238,2
15	2	399,3	1117	233,9
16	1,9	411	1192	237,2
17	1,6	427,4	1289	216,0
18	1,3	448,9	1446	196,9
19	1,2	471,1	1616	203,1
20	1	486,5	1756	183,9
21	1,7	467,6	1361	242,3